



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

해상 폐기물매립장에서 침투·이류 분산을 이용한
차수시스템의 지반공학적 성능 평가

Geotechnical Evaluation of the Performance of Barrier Systems on
Offshore Waste Landfill Using Seepage and Advection, Dispersion Analysis



지도교수 김 태 형

2019년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

김 향 은

본 논문을 김향은의 공학박사 학위논문으로 인준함

위원장

서 영 교



위 원

김 도 삼



위 원

홍 석 우



위 원

강 기 천



위 원

김 태 형



2019년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Photo	v
List of Figures	vi
Abstract	x vi

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 목적	3
1.3 연구의 범위	4

제 2 장 해상 폐기물매립장의 현황

2.1 해상 폐기물매립장	6
2.1.1 역할	6
2.1.2 수명주기	10
2.1.3 환경 영향	12
2.2 해상 폐기물매립장의 차수공법	15
2.2.1 폐기물 매립 호안과 차수공법	15
2.2.2 차수공의 차수 성능	17
2.2.3 차수공의 분류	19
2.3 시공사례	27
2.3.1 동경만 해상 폐기물매립장	27
2.3.2 오사카만 해상 폐기물매립장	30
2.3.3 다차바나만의 해상 폐기물매립장	34
2.3.4 싱가포르 세마카우 해상 폐기물매립장	37

제 3 장 침투·이류 분산(확산)의 이론 및 해석방법

3.1 침투·이류 분산(확산)의 개념	38
3.2 침투·이류 분산 해석 이론	39
3.2.1 지배방정식	39
3.2.2 해석프로그램	41
3.3 해석모델 및 해석조건	41
3.3.1 해석모델	41
3.3.2 해석조건	46

제 4 장 정상류 하에서의 바닥 차수시스템 차수성능 평가

4.1 개요	53
4.2 2중 연직벽체 호안	54
4.2.1 투수계수의 영향	54
4.2.2 두께의 영향	63
4.2.3 소결	65
4.3 경사제식 호안	66
4.3.1 투수계수의 영향	66
4.3.2 두께의 영향	77
4.3.3 소결	77

제 5 장 정상류 하에서의 호안 차수시스템 차수성능 평가

5.1 2중 연직벽체 호안	78
5.1.1 투수계수의 영향	78
5.1.2 두께 변화에 따른 오염물 분산영향	87
5.1.3 근입깊이에 따른 오염물 분산영향	89
5.1.4 소결	98

5.2 경사제식 호안	99
5.2.1 차수시트의 연장길이에 따른 오염물 분산영향	99
5.2.2 중간보호층 투수계수 변화에 따른 오염물 분산영향	108
5.2.3 소결	111
 제 6 장 조위변동 및 내수위 관리에 따른 차수시스템의 차수성능 평가	
6.1 조위변동의 영향	112
6.1.1 개요	112
6.1.2 2중 연직벽체 호안	114
6.1.3 경사제식 호안	132
6.2 내수위 관리에 따른 영향	150
6.2.1 개요	150
6.2.2 2중 연직벽체 호안	150
6.2.3 경사제식 호안	157
 제 7 장 결 론	
7.1 결론	163
7.2 향후 연구를 위한 제언	165

List of Tables

Table 2.1 Environmental standards for soil pollution (in Japan)	14
Table 2.2 Characteristics of water permeability foundation ground of disposal site water shield sheet	18
Table 3.1 Material properties used in advection-dispersion analysis	43
Table 3.2 Material properties of each soil and structure element	45
Table 3.3 Parametric analysis cases with different hydraulic conductivity and thick- ness of impermeable soil layer for vertical barrier wall type landfill	47
Table 3.4 Parametric analysis cases with different hydraulic conductivity and thick- ness of vertical barrier wall for vertical barrier wall type landfill	48
Table 3.5 Parametric analysis cases with different hydraulic conductivity of im- permeable soil layer and embedded depth of vertical barrier wall in im- permeable soil layer for vertical barrier wall type landfill	48
Table 3.6 Parametric analysis cases with different hydraulic conductivity and thick- ness of impermeable soil layer for rubble mound type landfill	50
Table 3.7 Parametric analysis cases with different hydraulic conductivity of vertical barrier wall and extended length of HDPE liner for rubble mound type landfill	51
Table 3.8 Equivalent hydraulic conductivity with different backfill materials of dam- aged HDPE liner(嘉門 雅史, 2002)	51
Table 6.1 Representative tidal level at the western, southern and eastern coast of Korea	113

List of Photo

Photo 1.1 Offshore waste landfill in Japan	2
Photo 2.1 Types of HDPE sheets	20
Photo 2.2 Steel tubing sheet pile (STSP) cut-off wall	22
Photo 2.3 States of swellable waterproofing material before swelling (left) and after swelling (right)	25



List of Figures

Figure 2.1	Classification of offshore waste landfill	7
Figure 2.2	Structural features of offshore waste landfill	9
Figure 2.3	Life cycle of offshore waste landfill	10
Figure 2.4	Transition of environmental burden in the life cycle of offshore waste landfill	11
Figure 2.5	The types of revetment of offshore waste landfill	16
Figure 2.6	Some examples of bottom barrier system for the case of area without impermeable soil layer	21
Figure 2.7	Embedment depth of vertical wall for preventing leakage	23
Figure 2.8	Fittings with various shapes in steel water barrier walls	26
Figure 2.9	Plans for placing Tokyo Bay bouncing offshore waste landfill	27
Figure 2.10	Tokyo Bay offshore waste landfill site reclamation status (2018)	28
Figure 2.11	Outer protection structure (Tokyo Bay offshore waste landfill site)	28
Figure 2.12	Exterior revetment construction (Tokyo Bay offshore waste landfill site)	29
Figure 2.13	Revetment structure drawing of intermediate partition (Tokyo Bay offshore waste landfill site)	29
Figure 2.14	Osaka Bay offshore waste landfill site construction plan and construction status	31
Figure 2.15	Revetment plan view of Amagasaki landfill	32
Figure 2.16	Revetment cross section of the Amagasaki landfill	33
Figure 2.17	Double STSP of revetment(Chae et al., 2003)	34
Figure 2.18	Tachabana Bay landfill under construction (Chae et al., 2003)	34

Figure 2.19 Rubble mound type inclined revetment cross section (Tachabana Bay Offshore waste landfill)	35
Figure 2.20 Joining operation of HDPE(Chae, et al., 2003)	35
Figure 2.21 Protection method of the surface of the first HDPE (Poor blended cemented soil) (Chae, et al., 2003)	36
Figure 2.22 View of Singapore's Semakau Offshore Waste Landfill	37
Figure 3.1 Diffusion of contaminant(Hwang, et al., 2018)	38
Figure 3.2 Dispersion of contaminant within the flow system(Hwang, et al., 2018)	39
Figure 3.3 Cross section and soil condition of double STSP type quay wall	42
Figure 3.4 Cross section and soil condition of rubble mound type quay wall	44
Figure 3.5 Numerical model of contaminant transport analysis in vertical barrier wall type waste landfill	46
Figure 3.6 Numerical model of contaminant transport analysis in rubble mound type waste landfill	49
Figure 4.1 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s	55
Figure 4.1 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s (continued)	56
Figure 4.2 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s	57
Figure 4.3 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s	59

Figure 4.4 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s	.....61
Figure 4.5 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s	.....61
Figure 4.6 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s	.....62
Figure 4.7 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness and hydraulic conductivity of soil layer	.....62
Figure 4.8 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s	.....63
Figure 4.9 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s	.....64
Figure 4.10 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s	.....64
Figure 4.11 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s in rubble mound type quay wall	.....67
Figure 4.12 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s in rubble mound type quay wall	.....69
Figure 4.13 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s in rubble mound type quay wall	.....71
Figure 4.14 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s	.....73
Figure 4.15 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s	.....73

Figure 4.16	Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s	.....74
Figure 4.17	Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness and hydraulic conductivity of soil layer	.....74
Figure 4.18	Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s	.....75
Figure 4.19	Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s	.....76
Figure 4.20	Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s	.....76
Figure 5.1	Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s in double STSP type quay wall	.....79
Figure 5.2	Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s in double STSP type quay wall	.....81
Figure 5.3	Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s in double STSP type quay wall	.....83
Figure 5.4	Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s	.....85
Figure 5.5	Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s	.....85

Figure 5.6 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s	86
Figure 5.7 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness and hydraulic conductivity of vertical barrier wall	86
Figure 5.8 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s	87
Figure 5.9 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s	88
Figure 5.10 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s	88
Figure 5.11 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s in double STSP type quay wall	90
Figure 5.12 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s in double STSP type quay wall	92
Figure 5.13 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s in double STSP type quay wall	94
Figure 5.14 Cumulative mass flux during 50 years with different embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s	96
Figure 5.15 Cumulative mass flux during 50 years with different embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s	96
Figure 5.16 Cumulative mass flux during 50 years with different embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s	97

Figure 5.17	Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative four extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s in rubble mound type quay wall	100
Figure 5.18	Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative four extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s in rubble mound type quay wall	102
Figure 5.19	Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative four extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s in rubble mound type quay wall	104
Figure 5.20	Cumulative mass flux during 50 years with different extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s	106
Figure 5.21	Cumulative mass flux during 50 years with different extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s	107
Figure 5.22	Cumulative mass flux during 50 years with different extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s	107
Figure 5.23	Time history plots of cumulative mass flux during 50 years with different equivalent hydraulic conductivity of damaged HDPE liner	108
Figure 5.24	Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with three different hydraulic conductivity of protection layer in the case of damaged HDPE liner in rubble mound type quay wall	109
Figure 6.1	Hypothetical sinusoidal tide level with two tidal range of 2m and 8m	113
Figure 6.2	Total head and flow vector under steady flow in double sheet pile quay wall where water level of land side is 1m higher than sea side	114
Figure 6.3	Total head and flow vector under steady flow in double sheet pile quay wall where water level of land side is 4m higher than sea side	116
Figure 6.4	Predicted plots of total head at the last four specific times under transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 2m)	117

Figure 6.5 Predicted plots of flow vectors at the last four specific times under transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 2m)	119
Figure 6.6 Predicted plots of total head at the last four specific times under transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 8m)	121
Figure 6.7 Predicted plots of flow vectors at the last four specific times transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 8m)	123
Figure 6.8 Four monitoring nodes to present time history graph of contaminant concentration	125
Figure 6.9 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under steady flow considering water level difference of 2m between sea and landfill sides	126
Figure 6.10 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under transient flow considering maximal tidal range of 2m	126
Figure 6.11 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under steady flow considering water level difference of 8m between sea and landfill sides	127
Figure 6.12 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under transient flow considering maximal tidal range of 8m	127
Figure 6.13 Comparison of time history of contaminant concentration between steady and transient flow during initial 1 day at Node A (case of maximal tidal range of 2m)	128
Figure 6.14 Comparison of time history of contaminant concentration between steady and transient flow during initial 1 day at node A (case of maximal tidal range of 8m)	129

Figure 6.15	Contour plots of contaminant concentration after 1 yr. (case of maximal tidal range of 2m)	130
Figure 6.16	Contour plots of contaminant concentration after 1 yr. (case of maximal tidal range of 8m)	131
Figure 6.17	Predicted plots of total head and flow vectors under steady flow in rubble mound type landfill (case of water level difference of 2m)	132
Figure 6.18	Predicted plots of total head and flow vectors under steady flow in rubble mound type landfill (case of water level difference of 4m)	134
Figure 6.19	Predicted plots of total head at the last four specific times under transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 2m)	135
Figure 6.20	Predicted plots of flow vectors at the last four specific times under transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 2m)	137
Figure 6.21	Predicted plots of total head at the last four specific times under transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 8m)	139
Figure 6.22	Predicted plots of flow vectors at the last four specific times under transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 8m)	141
Figure 6.23	Four monitoring nodes to present time history graph of contaminant concentration in rubble mound type quay wall	143
Figure 6.24	Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under steady flow considering water level difference of 2m between sea and landfill sides	144
Figure 6.25	Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under transient flow considering maximal tidal range of 2m	144

Figure 6.26	Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under steady flow considering water level difference of 8m between sea and landfill sides	145
Figure 6.27	Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under transient flow considering maximal tidal range of 8m	145
Figure 6.28	Comparison of time history of contaminant concentration between steady and transient flow during initial 1 day at Node A (case of maximal tidal range of 2m)	146
Figure 6.29	Comparison of time history of contaminant concentration between steady and transient flow during initial 1 day at Node A (case of maximal tidal range of 8m)	147
Figure 6.30	Contour plots of contaminant concentration after 1 yr. (case of maximal tidal range of 2m)	148
Figure 6.31	Contour plots of contaminant concentration after 1 yr. (case of maximal tidal range of 8m)	149
Figure 6.32	Five monitoring nodes to present time history graph of contaminant concentration for steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall	150
Figure 6.33	Time history graph of contaminant concentration at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall	151
Figure 6.34	Concentration after 50 years at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall	154
Figure 6.35	Five monitoring nodes to present time history graph of contaminant concentration for steady flow considering different water level of landfill side in rubble mound type quay wall	157

- Figure 6.36** Time history graph of contaminant concentration at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in rubble mound type quay wall158
- Figure 6.37** Concentration after 50 years at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall160



Geotechnical Evaluation of the Performance of Barrier Systems on Offshore Waste Landfill Using Seepage and Advection, Dispersion Analysis

Hyangeun Kim

Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Recently, the necessity of constructing a large-scale offshore waste landfill in the city's port area is increasing instead of construction of new waste landfill inland. Due to the development of society and the intermittent occurrence of disasters induced by earthquakes and typhoons, the amount of waste generation tends to increase every year. In the case of South Korea, there is no big problem of landfill capacity at the final disposal site at present; however, new site development of the final waste landfill is still a matter of concern because of the resident's complaints and NIMBY problem. In such a social atmosphere, it is considered as an alternative solution to build a final waste landfill at offshore. While there are no construction examples of offshore waste landfill in South Korea yet, and it is actually not provided the standards for construction of liner systems such as bottom layer and vertical barrier wall.

Therefore, in this study, the parametric analysis was conducted to evaluate

the optimum geotechnical performance of barrier system to prevent leakage of contaminants at the offshore waste landfill by considering seepage, advection, and dispersion. Based on overseas landfill cases, a double steel-pile and rubble mound types of revetment structures were selected as the offshore waste landfill. The analysis was conducted under steady and unsteady flows on the basic liners, bottom layer and vertical barrier wall.

First, in case of steady flow, the parametric analysis was conducted to evaluate optimum geotechnical performance of barrier system on thickness and hydraulic conductivity of bottom layer both double sheet-pile and rubble mound types of revetments structures. In addition, the thickness, hydraulic conductivity, and embedment depth of double steel-pile structure were investigated to evaluate the performance of vertical barrier wall. For the rubble mound type of revetment, the parametric analysis was conducted on the length of HDPE sheet and the hydraulic conductivity of rubble mound type back-fill layer for revetment structure. Based on the study results, the minimum criteria is proposed which indicate optimal performance of barrier system on the both revetment structures.

Then, the parametric analysis was performed under unsteady flow condition considering tidal fluctuation where the offshore environment waste landfill is constructed. The result was compared to the ones obtained from the steady flow condition. Moreover, the analysis was performed considering the water level fluctuation inside the landfill at the time of actual landfill management and the results were compared to the preceding results.

Based on the outcomes of this study, the results obtained from the steady flow condition (where the water level in the landfill is set higher than the sea level) is much conservative comparing to the cases where the tidal fluctuation and water level is inside the landfill. Therefore, in general conditions, it is proper to consider the steady flow condition due to seepage, advection, and

dispersion in the analysis of the leakage of contaminants at offshore waste landfill.



제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

최근 신규 폐기물매립장은 지양하고 도시의 항만 지역에 대규모 해상 폐기물매립장(Photo 1.1 참조) 건설 도입의 필요성이 커지고 있다. 사회 발전과 간헐적으로 발생하는 재난·재해의 증가로 인해 연간 폐기물 발생량은 아직도 증가하는 추세를 보이고 있다. 우리나라의 경우 2015년 기준 404,812톤 폐기물이 발생되었으며, 이중 35,133톤이 매립되고 661톤이 해역으로 배출되었다(Korea Environment Corporation, 2016). 육상 폐기물매립장의 수용 용량은 현재는 큰 문제가 없으나 여전히 신규 폐기물매립장의 부지 확보가 주민들의 민원 및 주변의 환경문제에 대한 우려로 어려운 상황에 놓여있다. 이러한 사회 환경에서 신규 폐기물매립장을 해상에 조성하는 것이 대안으로 고려되고 있다. 일본은 이미 1960년대 후반부터 해상에 폐기물매립장을 조성하여 현재 약 40개소의 해상 폐기물매립장을 운영하고 있다. 특히 동경만, 오사카, 요코하마 등 대도시 인근에는 모두 해상 폐기물매립장이 조성되어 있으며, 폐기물 매립처리에 있어서 해상 폐기물매립장에 대한 의존도가 매우 높다. 또한, 싱가포르에서도 세마카우(Pulau Semakau) 해상 폐기물매립장을 조성하여 소각재 등을 매립 처리하고 있다(Kwon et al., 2012).

폐기물매립장에서는 내부에서 발생하는 침출수와 오염물질이 외부로 유출되지 않도록 하는 것이 매우 중요하다. 육상 매립장에서는 바닥과 사면부에 점토 차수층과 HDPE 차수시트를 설치하여 침출수의 외부유출을 방지하고 있다. 우리나라 폐기물 관리법 시행규칙에 따르면 육상 폐기물매립장에서의 차수시설 기준은 하부 점토지반이 두께 1.0m이상 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 이하이거나, 점성토 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 이고 두께는 50cm 이상인 지반에 차수시트 1겹 이

상, 2.0mm 이상의 두께로 포설하도록 되어 있다(Korea Ministry of Environment, 2016).



Photo 1.1 Offshore waste landfill in Japan

육상의 폐기물매립장은 차수시설로 점토층, 차수시트 등을 설치하고 있다. 해상 폐기물매립장에서는 해상으로 침출수가 유출되는 것을 방지하기 위하여 육상 폐기물매립장과는 달리 호안 및 측면차수벽체 등의 차수공 설치가 추가적으로 필요하다. 또한 바닥차수층은 자연지반 이용을 권장하고 있다. 일본의 사례를 보면 해저 점토지반을 지반차수층으로 하고 측면차수벽체를 설치하여 침출수 및 오염물질의 유출을 차단하고 있다. 일본에서는 해상 폐기물매립장에서 하부지반의 차수성능은 ‘두께 5m 이상, 투수계수 $k=1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 이하’로 규정하고 있다. 또한, 측면차수공에 대해서는 불투수성 지층에 대한 근입깊이가 하부지반의 차수성능을 만족시키고, 흐름 경로가 하부지반 두께 기준에 부합되도록 2.5m이상의 근입깊이(측면차수벽체를 우회하는 최단 흐름 경로는 5m 이상)를 확보하도록 규정하고 있다(Kwon et al., 2012). 그러나, 국내에는 아직 해상 폐기물매립장 건설사례가 없으므로 바닥 및 측면차수벽체 등에 대한 차수공 설치기준이 별도로 마련되어 있지 않은 실정이다.

1.2 연구의 목적

해상 폐기물매립장의 차수는 크게 바닥 차수 및 측면 차수로 구분할 수 있으며, 바닥 및 측면 차수시설에는 다양한 구조 형식이 존재한다. 침출수 유출을 방지하기 위하여 바닥 및 측면 차수시스템으로 완전히 차수하는 것은 비경제적이므로(Mitchell & Rumer, 1997), 오염물질의 유출방지 기능을 충분히 발휘하면서도 경제적인 최적의 기준을 산정할 필요가 있다. 이를 위해서는 우선적으로 각 차수시스템별 다양한 조건 하에서의 오염물 이동특성 파악과 오염물질 유출 방지 효과에 대한 분석이 필요하다.

해상 폐기물매립장은 그 입지적 특성상 조석의 영향을 받으므로 폐기물매립장 주변 지층 내의 지하수 흐름은 비정상류 흐름을 나타내고, 그에 따라 오염물 농도가 시간에 따라 변화할 수 있다. 그러므로 해상 폐기물매립장의 경우 육상 폐기물매립장과 달리 폐기물 내 오염물의 이동을 분석할 때 조수간만의 영향을 반영할 필요가 있다. 하지만 이러한 비정상류 흐름에서의 오염물 이동 및 농도 분포를 수식적으로 예측하는 것은 어렵다(Foose, 2010). 따라서 이러한 경우 수치해석적인 방법이 이용되는데 해석에 상당한 계산 성능과 계산 비용이 요구되므로 정상상태 하에서의 오염물 이동 및 농도 분포를 예측하는 것이 일반적이다. 그리고 정상류 상태를 가정하여 차수시스템의 차수성능을 평가하는 것이 보다 보수적인 설계를 위하여 바람직한 측면도 있다(Rubin & Rabideau, 2000; Foose, 2010).

본 연구에서는 해상 폐기물매립장을 건설함에 있어 가장 기본적인 차수시스템으로 사용되는 불투수성 점성토지반 바닥 차수시스템과 측면 차수시스템의 다양한 조건하에서 침투·이류 분산해석을 지반 공학적인 접근방법으로 수행하여 그 결과를 분석한 후 차수공의 설치기준 등의 기본방향을 제시하고자 한다.

1.3 연구의 범위

본 연구에서는 해상 폐기물매립장에서의 유해물질을 포함하는 침출수의 누출에 대해 이류뿐만 아니라 확산 및 분산을 고려하여 평가하고 적절한 차수공의 최적성능을 제시하고자 가장 기본적인 차수시스템으로 사용되는 불투수성 점성토지반 바닥 차수시스템과 호안의 측면 차수시스템에 대하여 다양한 조건 하에서 침투·이류 분산해석을 수행하는 것을 연구의 범위로 설정하였다.

해상 폐기물매립장의 차수시스템의 기본방향을 제시하기 위하여 폐기물매립장 바닥 및 측면차수시스템을 연구 대상으로 선정하였다. 바닥 차수시스템은 자연 점토지반을 대상으로 하였으며, 측면차수시스템은 호안의 대표적인 단면인 2중 연직벽체(강관널말뚝) 호안과 경사제식 호안을 선정하였다. 선정된 단면에 대해 정상류 상태 및 조위변동을 고려하여 2차원 침투·이류 분산해석을 다음과 같이 실시하였다.

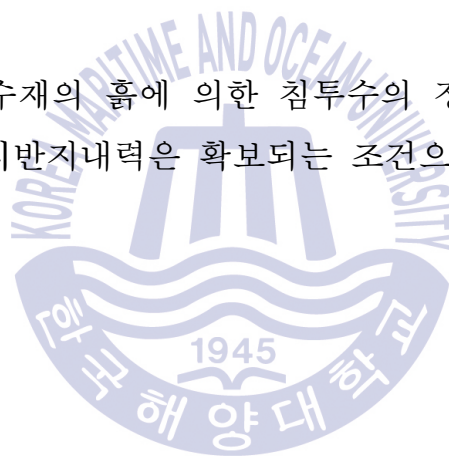
- 1) 정상류 하에서의 바닥 차수시스템 차수성능 평가
 - ① 바닥 차수시스템 투수계수에 따른 오염물 분산영향
 - ② 바닥 차수시스템 두께에 따른 오염물 분산영향
- 2) 정상류 하에서의 측면 차수시스템 차수성능 평가
 - ① 2중 연직벽체 호안
 - 투수계수에 따른 오염물 분산영향
 - 두께 변화에 따른 오염물 분산영향
 - 근입깊이에 따른 오염물 분산영향
 - ② 경사제식 호안
 - 차수시트의 연장길이에 따른 오염물 분산영향
 - 중간보호층 투수계수 변화에 따른 오염물 분산영향

또한, 해상 폐기물매립장의 경우 입지 특성상 조수간만의 영향을 받으므로 이를 반영할 필요가 있다. 물의 흐름은 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르기 마련이므로 폐기물매립장 내 침출수위를 해역의 수두와 같거나 낮게 유지할 경우에 대해서도 검토할 필요가 있다.

따라서, 정상류 하에서의 차수성능평가 결과를 반영하여 비정상류 흐름일 경우와 내수위 관리를 조정할 경우에도 2차원 침투·이류 분산해석을 실시하였다.

- 1) 조위변동의 영향에 따른 차수시스템 차수성능 평가
- 2) 내수위 관리에 따른 영향

해석과정에서 바닥차수재의 흠에 의한 침투수의 정화작용, 흡착은 무시하였다. 그리고 기본적으로 지반지내력은 확보되는 조건으로 한정된다.



제 2 장 해상 폐기물매립장의 현황

2.1 해상 폐기물매립장

2.1.1 역할

해상 폐기물매립장은 일반적으로 항만 지역에 건립하는 대규모 폐기물매립장을 말하며, 국내에서는 사용사례가 없으나 일본에서 다수 사용되고 있으므로 일본에서 이용하고 있는 해상 폐기물매립장 자료를 참고하여 조사하였다. 폐기물매립장에는, 폐기물의 보관·처리, 주위 환경 보전, 토지의 지역 환원 등의 역할 기능이 있다. 이들의 원활한 역할을 위해서, 해상 폐기물매립장은 매립 호안, 차수공, 보유수 등 집·배수 설비, 침출액 처리 설비, 모니터링 설비, 기타 관련 설비로 구성되어 있다. 여기서 폐기물매립장은 Fig. 2.1과 같이 안정형, 관리형, 차단형 폐기물매립장으로 대별된다. 해상 폐기물매립장에서는 바다 특유의 외적 조건이 복잡하고 다양하기 때문에 차단형 폐기물매립장 보다는 안정형 또는 관리형 폐기물매립장이 일반적으로 이용되고 있다. 관리형 폐기물매립장에서는 환경을 오염시킬 가능성이 있는 폐기물을 매립하기 때문에 차수성의 신뢰성 확보는 가장 중요한 검토 항목이다. 육상 폐기물매립장에서는 차수공에 누수 검지 시스템을 부가함으로써 신뢰성 향상을 도모하고 있는 반면 해상 폐기물매립장에서는 검지 시스템의 실용화에는 이르지 않지만 매립 호안을 활용하고 보유수의 수위 관리에 의해서 폐기물매립장 내외의 수위차를 조절함으로써 신뢰성 향상을 도모하고 있다.

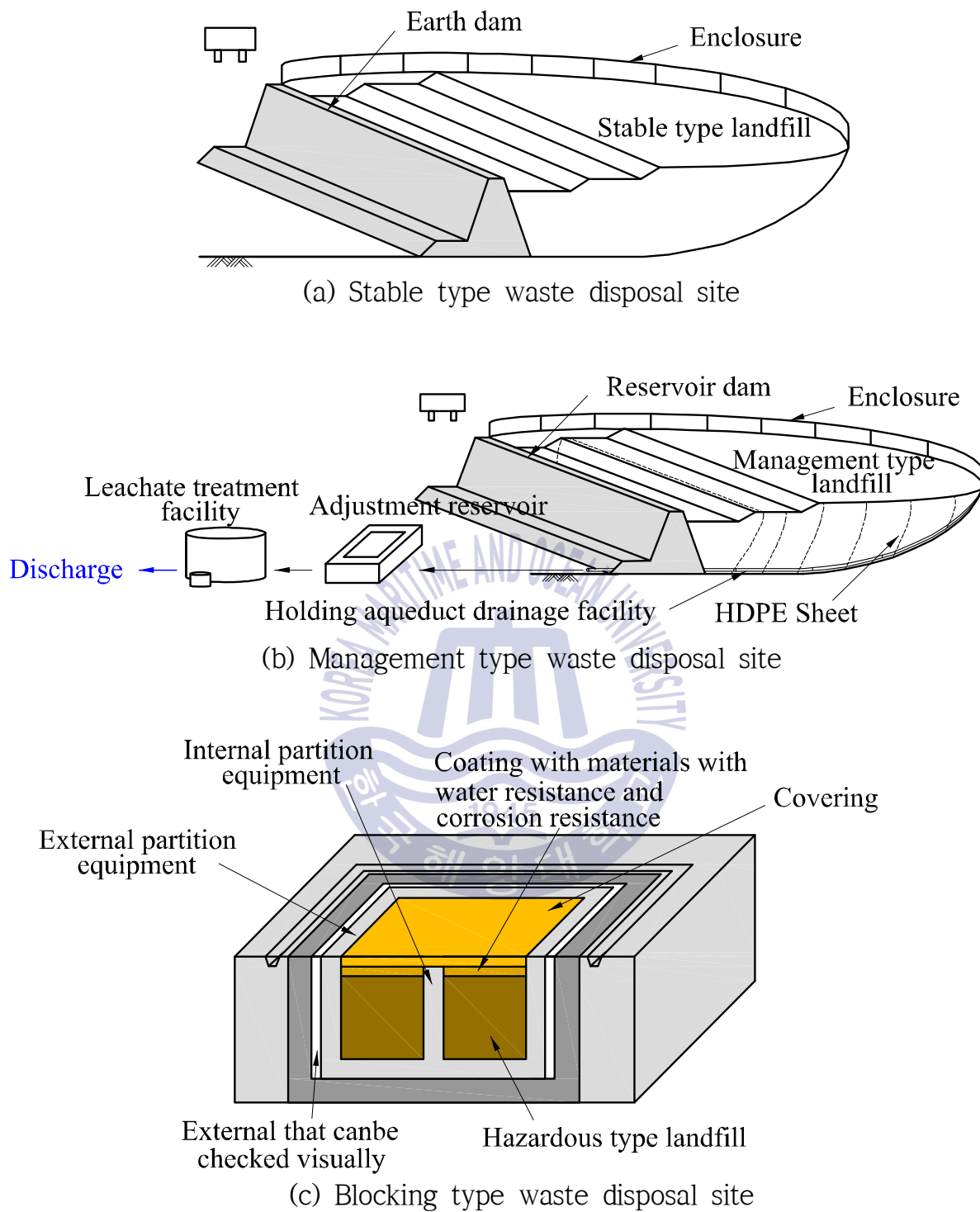


Figure 2.1 Classification of offshore waste landfill

또한, 해상 폐기물매립장은 연안에 건설되기 때문에 기존의 폐기물매립장인 육상 폐기물매립장과는 다른 특징을 가진다. 우선, 육상 폐기물매립장에 비해 매립장의 면적이 매우 크기 때문에 대량의 폐기물을 수용할 수 있을 뿐만 아니라 지하수와 같은 수원을 오염시킬 위험이 낮다는 점도 유리하다. 한편, 해상 폐기물매립장은 해역에 접하고 있기 때문에 육상 폐기물매립장과는 다른 특징을 가지고 있으므로 이로인해 수반되는 새로운 문제가 발생하고 있다. 해상 폐기물매립장의 특징을 건설에서 폐지까지 시간 순으로 나열하면, 다음과 같은 항목으로 요약할 수 있다(みなと総合研究財団 (WAVE), 2008).

- (i) 파랑과 고조, 해일과 같은 해상 특유의 외력에 대해서 안전성과 동시에 폐기물매립장 내의 유해물질이 해역으로 유출되지 않도록 하여야 한다.
- (ii) 해상 폐기물매립장 건설의 해상 또는 해중에서 시공이 필요하기 때문에 시공 정확도를 확보할 수 있는 시공 방법을 선정할 필요가 있다.
- (iii) 해상 폐기물매립장 내의 보유수 등은 폐기물 매립이 시작된 시점에서 필요에 따라 적절히 처리하고 매립장 외부로 배출해야 한다.
- (iv) 해상 폐기물매립장 건설에서 차수성을 확보하기 위해 점성토 지반에 건설하는 경우가 많았으나, 점성토 지반은 연약한 경우가 많다. 그래서, 점성토 지반이 갖는 차수성을 확보하면서 연약지반 대책공법을 실시할 필요가 있다.
- (v) 조석, 파랑 등에 의해서 해상 폐기물매립장 안팎의 수위차는 변화하므로 이들의 영향도 고려하여 차수공을 선정할 필요가 있다.
- (vi) 해상 폐기물매립장의 유지관리에서 모니터링할 필요가 있는 항목은 호안의 안정성 및 차수공의 기능유지에 관한 모니터링, 주변 환경에 미치는 영향에 대한 모니터링이다.
- (vii) 해상 폐기물매립장은 도시 지역의 항만에 건설되는 경우가 많기 때문에 폐매립장부지의 이용 가능성이 높다.

(iii)에서와 같이 해상 폐기물매립장은 매립지 내에 보유수가 있기 때문에, 집수지 등을 설치하여 보유수의 수위를 조절할 필요가 있다. 게다가 폐기물매립장 내의 보유수에는 폐기물 내의 물뿐만 아니라, 매립 이전부터 매립장에 잔류하고 있는 해수와 (vi)에서와 같이 우수나 월파해수 등이 수위에 영향을 준다. 이들의 영향으로 해상 폐기물매립장 내의 구조적 특징으로서, 매립장의 폐기물층이 보유수 등수위면 이하의 보유수 등으로 채워진 체수영역과 보유수 등수위면 이상의 비체수영역으로 나뉘는 것을 들 수 있다(日本環境衛生センター(MOE), 2008)(Fig. 2.2 참조). 해상 폐기물매립장에서는 지하수위가 높고, 폐기물층의 대부분은 체수영역인 포화상태에 있으므로 혐기성 환경에 있다. 체수영역 내의 폐기물에 함유된 유해물질의 분해는 현저히 늦어지기 때문에 안정화에는 상당히 장기간이 요구된다. 또 육상 폐기물매립장과 달리 표고차가 없는 구조이기 때문에 보유수의 처리에 있어서 물의 흐름도 비교적 완만하다고 할 수 있다(渡部 洋一 et al., 2013). 이상에서, 해상 폐기물매립장의 특징을 파악한 다음에는 환경영향을 저감시키기 위해 차수성능을 향상시킬 수 있는 방안이 매우 중요하다는 것을 시사한다.

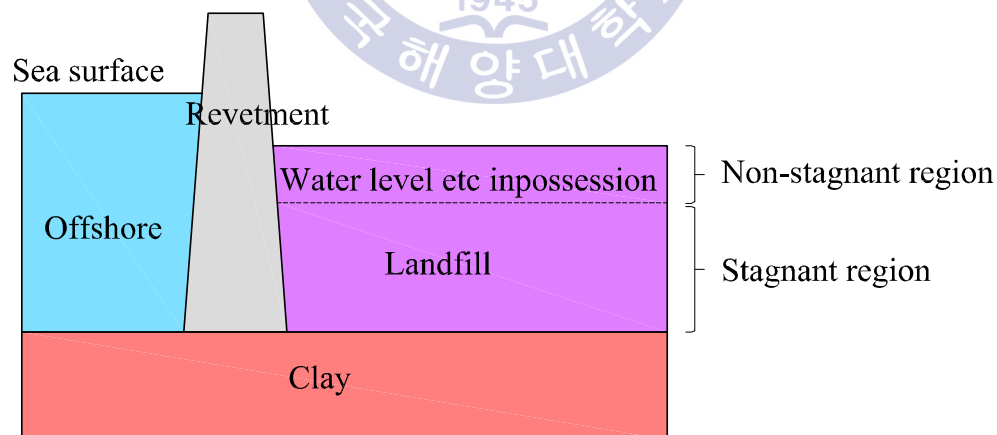


Figure 2.2 Structural features of offshore waste landfill

2.1.2 수명주기

폐기물매립장의 수명주기(life cycle)는 일반적으로 Fig. 2.3과 같이 나타낼 수 있다. 첫째, 폐기물매립장의 계획단계에서 환경영향조사를 실시하고, 주변 환경에 대해서 인근 주민의 합의를 구할 필요가 있다. 다음으로 건설 용지에서의 외적 요인을 고려하면서 환경 안정성의 확보가 가능한 폐기물매립장의 설계 및 건설이 진행된다. 폐기물매립장을 완성한 다음에는 주변 지역에서 폐기물 매립이 시작된다. 해상 폐기물매립장의 매립에서는 바닥 차수공이 점성토로 된 불투수성 지반이 이용되는 경우가 많고, 매립 지반을 확보하기 위해서 격자상 매립 및 층상 매립 방식이 취해진다(渡部 洋一 et al., 2013). 그 후, 폐기물매립장의 용량이 제로가 된 시점에 폐기물매립장의 폐쇄가 이뤄진다(일본 폐기물 매립처리 처분 연구회, 2002). 하지만 폐부지의 이용이 폐기물매립장 폐쇄 후 곧바로 이뤄지는 것은 아니다. 폐기물매립장은 폐기물 매립 기간뿐 아니라, 매립이 완료된 뒤에도 유해물질의 분해는 계속되고 있어, 유해물질의 안정화가 확인될 때까지 모니터링할 필요가 있다. 폐기물매립장 내 침출수와 매립 가스가 안정된 상태로 되고, 주변 환경에 영향을 주지 않는 것이 확인되어야 비로소 폐기물매립장은 폐지된다. 일본의 경우 폐기물매립장은 폐지되기까지는 폐기물 처리법의 규제 하에 있고 폐지 후에는 토양 오염 방지법 하에서 관리되고 있다. 폐기물매립장의 폐지 후 안정화 상황 등에 따라 이용 형태가 제한될 수 있지만 다양한 방법으로 재이용된다(花嶋 正孝 et al., 2002).

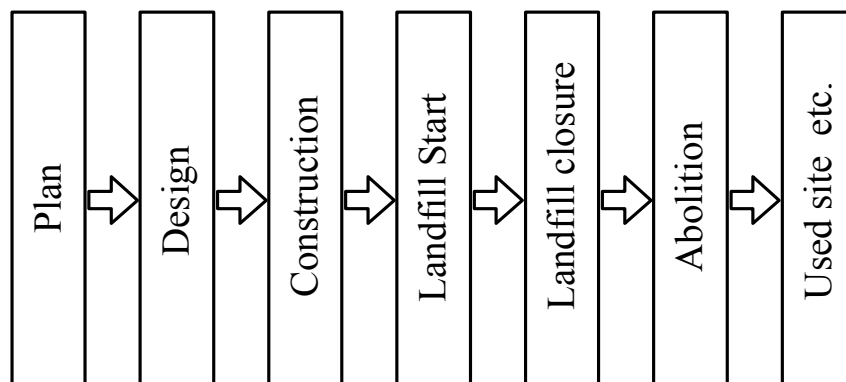


Figure 2.3 Life cycle of offshore waste landfill

여기에서 폐기물매립장의 수명주기(life cycle)에 대응하는 환경 부하 배출량 추이의 이미지를 Fig. 2.4에 나타낸다(中山 裕文 et al., 2002). 폐기물매립장의 가장 큰 목적은 폐기물에 생기는 환경 부하를 외부에 누출되지 않도록 봉쇄하는 것이다. 폐기물매립장 내 환경 부하는 폐기물매립장 내에서 안정화시켜 폐기물매립장 밖으로 이동할 우려가 없도록 하는 것과 침출수 처리시설 등에 의해 처리되어 삭감시키는 것으로 크게 나눌 수 있다. 그래서 Fig. 2.3에 나타내는 폐기물매립장 내에서 유지되는 환경 부하 배출량은 이들의 총합으로 표현된다고 할 수 있다. 한편, 해상 폐기물매립장은 2.1.1에 기술하였듯이 폐기물의 안정화에 장기간을 요하기 때문에 폐기물매립장의 차수성능에 따라 폐기물매립장에서 유지되어야 하는 환경 부하 배출량이 폐기물매립장 밖으로 누출될 가능성이 있다. 따라서, 폐기물매립장 밖으로 누출되는 환경 부하 배출량은 공용 초기 시점에는 억제되고 있어도 시간이 경과하여 폐기물매립장의 차수성능이 불확실해질 경우 예기치 않은 유해물질의 누출이 발생할 수 있으므로 장기적인 공용을 거치는 과정에서 환경 부하는 증가할 수 있다. 설계 단계에서도 차수성능을 예상할 수 없었기 때문에 주위 환경에 영향을 줄 정도의 환경 부하가 누출되었을 때는 환경 피해의 발견 시점이 지연될 수 있다. 이러한 위험을 방지하기 위해 폐기물매립장의 차수성능을 충분히 파악하고 주변 환경에 영향을 주지 않도록 차수공을 적절히 관리할 필요가 있다.

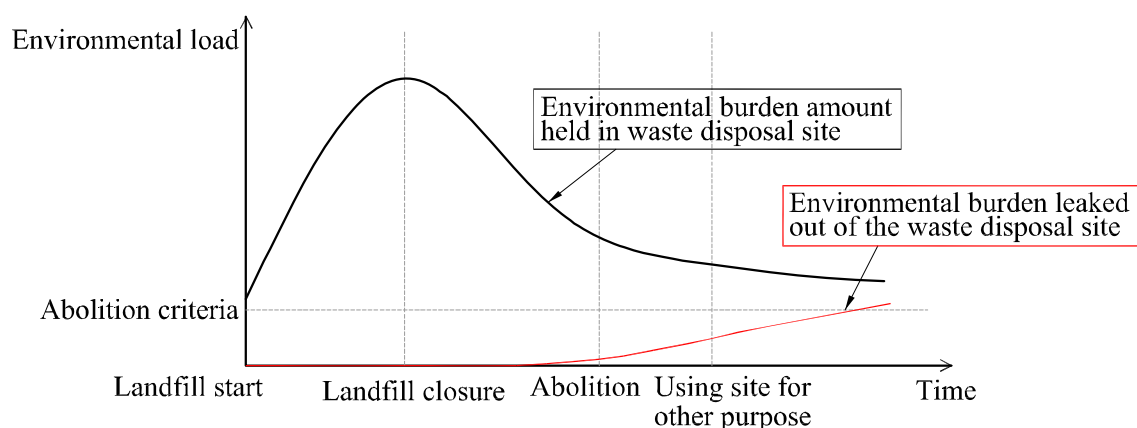


Figure 2.4 Transition of environmental burden in the life cycle of offshore waste landfill

2.1.3 환경 영향

해상 폐기물매립장 건설, 유지관리 및 보수에 있어서는 매립된 폐기물에서 생기는 유해한 침출수나 비산에 의해 생기는 주변 환경의 환경 피해에 대해서 노출 경로를 파악하는 것과 함께 충분히 주의하여 대책을 수립할 필요가 있다.

해상 폐기물매립장에 매립되는 폐기물에는 소각 찌꺼기가 차지하는 비중이 커지고 있고 소각 찌꺼기 중에 포함된 중금속이 주 환경 오염물질이다. 최근 일본의 폐기물 최종 처리 용량이 다급한 상황 하에서 소각 처분에 의한 폐기물의 감용화가 적극적으로 추진된 영향이 크다. 중금속은 주로 비중이 5를 넘어서는 금속의 총칭이며, 토양·지하수 오염물질의 주요 원인의 하나이다. 환경기준에서는, 카드뮴, 납, 육가크롬, 비소, 수은, 셀렌 등이 규정되어 있다. 중금속의 형태나 거동은 흙에서의 흡착과 간극수의 pH나 산화환원전위 등의 영향을 받기 때문에 해상 폐기물매립장 내의 보유수의 상황을 주의할 필요가 있다(勝見武, 2005). 지반오염에 있어서는 중금속은 석유계 물질에 비해서 이동성이 낮은 경향이 있지만, 중금속류는 수용성이기 때문에 폐기물에서 매립장 밖으로의 누수가 생긴 경우에는 중금속류도 침출수와 함께 누출될 우려가 있다. 그리고, 해상 폐기물매립장에서 누출되는 유해물질에 의한 오염 리스크를 저감하기 위해 차수공이 이용된다. 차수공의 차수성능은 투수계수로 평가되는 경우가 많고 침출수의 누출을 억제할 수 있어도 침출수의 누출을 완전히 방지하는 차수공의 시공은 어렵다. 다시 말하면 해상 폐기물매립장에서 누출되는 침출수에 의한 주변 환경의 오염 위험도를 완벽하게 없애는 것은 현재 불가능하며 오염 위험을 어떻게 경감·관리하는가가 중요하다고 할 수 있다.

해상 폐기물매립장에서의 폐기물 침출수에 기인하는 주변 환경의 오염 위험도를 평가·관리하기 위해, “일반 폐기물의 최종매립장 및 산업 폐기물의 최종매립장에 관한 기술적 기준에 관한 법률”(Japan Ministry of Health, Labour and Welfare, 1998)에서 연 1회 이상의 빈도로 폐기물매립장 외 해역의 수질에 관해 모니터링을 하도록 하고 있다. 즉, 주변 해역의 수질 및 해저바닥에 관한 환경기준치(관리기준치)로서는 “지하수의 수질오염에 관한 환경기준” (Japan

Ministry of Environment, 1999) 및 “토양의 오염에 관한 환경기준” (Japan Ministry of Environment, 1991)이 일반적으로 적용되고 있다. 해상 폐기물매립장은 설치조건 상 육상 폐기물매립장과 비교하여 지하수오염 리스크가 작기 때문에 해상 폐기물매립장에서의 해저바닥의 오염이 문제가 된다. Table 2.1에 “토양의 오염에 관한 환경기준”의 대상이 되는 유해물질 및 환경기준치를 나타내고 있다. Table 2.1에 나타내는 유해물질에서 모니터링에 의해 폐기물매립장 외에서 환경기준치 이상의 유해물질이 검출되는 등 이상이 발생한 경우에는 즉시 필요한 조치가 뒤따르게 된다. 한편, 해상 폐기물매립장에 관한 대책공법은 아직 개발 중에 있으며, 해상 폐기물매립장은 장기간에 걸쳐 공용되는 과정에서 유해물질이 누출되는 경우의 대응책을 마련해 가지 않으면 안 된다.



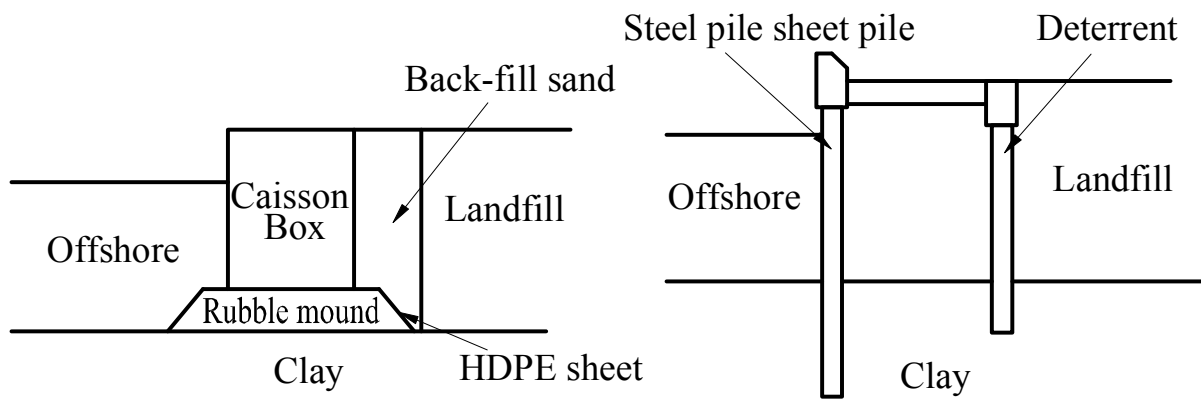
Table 2.1 Environmental standards for soil pollution (in Japan)

Item	Reference value
Cadmium	0.01mg/ℓ or less
All cyan	Not to be detected
Organic phosphorus	Not to be detected
lead	0.01mg/ℓ or less
Hexavalent chromium	0.05mg/ℓ or less
arsenic	0.01mg/ℓ or less
Total mercury	0.0005mg/ℓ or less
Alkyl mercury	Not to be detected
PCB	Not to be detected
Dichloromethane	0.02mg/ℓ or less
Carbon tetrachloride	0.002mg/ℓ or less
1 · 2-dichloroethane	0.004mg/ℓ or less
1 · 1-dichloroethylene	0.02mg/ℓ or less
Cis-1 · 2-dichloroethylene	0.04mg/ℓ or less
1 · 1 · 1-trichloroethane	1mg/ℓ or less
1 · 1 · 2-trichloroethane	0.006mg/ℓ or less
Trichlorethylene	0.03mg/ℓ or less
Tetrachlorethylene	0.01mg/ℓ or less
1 · 3-dichloropropene	0.002mg/ℓ or less
Thiuram	0.006mg/ℓ or less
Simazine	0.003mg/ℓ or less
Thiobencarb	0.02mg/ℓ or less
Benzene	0.01mg/ℓ or less
Selenium	0.01mg/ℓ or less

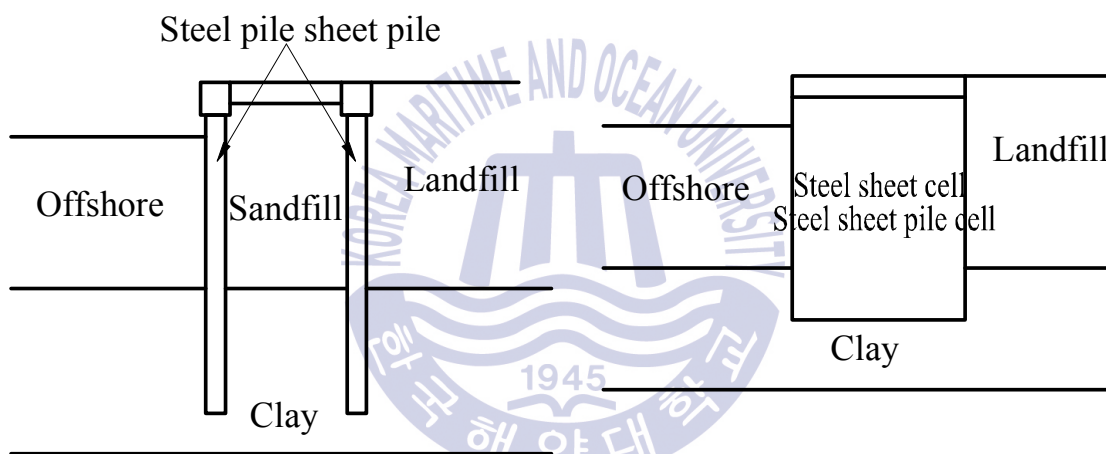
2.2 해상 폐기물매립장의 차수공법

2.2.1 폐기물 매립 호안과 차수공법

폐기물 매립 호안이란 해상 내 건설되는 폐기물매립장 특유의 호안 구조물 형식이다. 폐기물 매립 호안의 설계에 관련된 조건으로 파랑과 조석, 지진, 강우 등을 들 수 있다. 해상 폐기물매립장은 해역에 접하고 있어 조석이나 파랑 등의 작용을 끊임없이 받고 있기 때문에 이들 외적인 요인의 영향을 줄이기 위한 역학적인 기능이 폐기물 호안에는 요구된다(일본 폐기물 매립처리 처분 연구회, 2002). 또한, 차수공이란 폐기물매립장의 측면 및 바닥을 형성하고 매립장 내에서의 오염수 등의 침출을 방지하기 위해 필요한 차수의 효력을 가지는 구조체를 가리킨다(일본 폐기물 매립처리 처분 연구회, 2002). “일반 폐기물의 최종매립장 및 산업 폐기물의 최종매립장에 관한 기술적 기준을 정하는 법률의 운용에 따른 유의사항에 대해서”에서는 해상 폐기물매립장에 관한 사항으로 호안이 차수공에 해당하는 경우, 호안이 차수성능을 가지지 않으면 안 되도록 되어 있다. 즉 폐기물 매립 호안이 차수공으로 다뤄지는 것을 보여주고 있다. 본 연구에서는 폐기물 매립 호안과 차수공에서 요구되는 역학적 성능 및 차수 성능 중에 차수성능에 주목하고 논의를 진행한다. 다음으로 비교적 실적이 많은 호안 구조형식을 Fig. 2.5에 나타낸다. 호안 본체의 구조 형식은 앞서 기술한 역학적 기능 및 차수성능과의 조합, 공사비 등 각각의 폐기물매립장 특유의 조건을 고려하여 선정된다. 또한, 상황에 따라 Fig. 2.5에 나타내는 호안 형식이 병용되기도 한다. 게다가 해상 폐기물매립장의 측면 및 저면의 차수공은 항만법뿐만 아니라 폐기물 처리법의 적용을 받는다. 차수공에 적용되는 법령은 폐기물매립장 건설에서 폐기물의 매립, 폐기물매립장의 폐쇄(폐지)되기까지는 항만법과 폐기물처리법의 이중의 적용을 받는다(WAVE, 2008). 폐기물매립장으로서 폐쇄(폐지) 후의 폐부지 이용의 단계에 있어서는 항만법 하에서 토지이용 및 시설의 유지·관리보수가 실시되게 된다(WAVE, 2008).

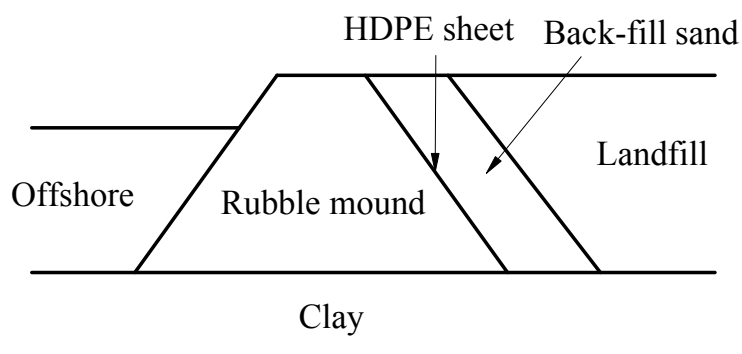


(a) Gravitational caisson seawall structure (b) Deterrent steel sheet pile structure



(c) Double steel tubing sheet pile (STSP)

(d) Cell type seawall structure



(e) Inclined seawall structure

Figure 2.5 The types of revetment of offshore waste landfill

2.2.2 차수공의 차수 성능

폐기물매립장 내의 보유수 등이 외부로 침출되는 것을 방지하는 것과 동시에 주변 해역에 환경 영향을 미치지 않는 상태를 폐기물이 안정화될 때까지 장기간에 걸쳐 유지하는 것이 해상 폐기물매립장에서 요구되는 차수성능이라고 생각할 수 있다. 측면 및 바닥의 차수공 기준은 “일반 폐기물의 최종매립장 및 산업 폐기물의 최종매립장에 관한 기술적 기준에 관한 법률”(Japan Ministry of Health, Labour and Welfare, 1998)에 의해 정해졌으며 다음과 같은 조건을 충족해야 한다. 단, 불투수성 지반이 존재하는 경우는 이에 제한되지 않는다.

- ① 두께 50cm이상이고 투수계수(k)가 $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 이하인 점토층 또는 이와 동등 이상의 층에 차수시트가 부설되는 경우
- ② 두께 5cm이상이고 투수계수(k)가 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 이하의 아스팔트 콘크리트 층 또는 이와 동등 이상의 층에 차수시트가 부설되는 경우.
- ③ 표면에 이중의 차수시트가 부설되는 경우(이중의 차수시트가 동시에 손상되는 것을 방지할 수 있는 부직포 등의 보호층이 설치되는 것에 한한다). 단, 폐기물매립장 저면에 불투수성 지반이 존재하는 경우에는 이하의 측면 차수공을 설치한다.
- ④ 불투수성 지반보다 위에 위치한 투수성 지반의 투전치가 1이하가 되도록 약액주입 등으로 고화시키는 경우
- ⑤ 두께 50cm이상이고 투수계수(k)가 $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 이하의 연속벽이 불투수성 지반까지 설치되는 경우.
- ⑥ 강(강관)널말뚝이 불투수성 지반까지 설치되는 경우.

①~③은 저면과 비탈면의 차수공을 대상으로 하고 있으며, 중력식과 사석식의 폐기물 매립 호안에 적용될 것으로 생각된다. 한편, ④~⑥에 대해서는 강관 널말뚝식 차수벽 등의 측면 차수공을 대상으로 한다. 해상 폐기물매립장에서는 배후 지반을 포함하여 강(강관)널말뚝을 균일층으로 치환한 환산 투수 계수에 의해 강관 널말뚝 차수벽 등의 차수성능이 평가되는 것이 일반적이다.

차수공의 차수성능은 누출수의 누출에 요하는 시간, 즉 투수계수 및 층두께로 평가되기 때문에 요구되는 측면 차수공의 환산 투수계수가 $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 이하이고 층두께 50cm이상의 강(강관)널말뚝벽은 ⑤의 기술사항과 동등 이상의 성능을 만족하는 것으로 간주되어 폐기물매립장의 차수공으로 이용된다. 즉, 현재의 차수공 기준에서 차수공의 성능은 투수계수와 층두께의 비로 정해지는 경우가 많은 것으로 생각된다. 이 경우 침출수의 누출을 이류로밖에 받아들여지지 않아 확산 및 분산에 의한 누출의 영향은 고려되지 않는다. 폐기물매립장에 이용되는 차수공은 상기에 나타낸 차수공 기준이 확보되어 있으면 차수성능이 담보되는 것으로 되어 있지만, 확산 및 분산의 영향이 탁월하다고 할 수 있는 폐기물매립장에 대해서는 불충분하다고 할 수 있다. 게다가 실제로 폐기물매립장에 이용되는 차수공의 투수계수는 차수공 기준보다 1~2배 낮게 설정되고 있다. 또한 Table 2.2과 같이 유럽과 미국에서 채택되고 있는 차수시트의 하부 지반 구조와 비교하여 일본의 차수공기준은 차수성능이 높게 설정되어 있다고 볼 수 있다(嘉門 雅史 et al., 1998). 그러므로 차수공 기준에 관해서는 유해물질의 누출 거동을 파악한 후 결정할 필요가 있다.

Table 2.2 Characteristics of water permeability foundation ground of disposal site water shield sheet

Country	Soil classification	Layer thickness	Permeability coefficient
Japan	clay layer	50cm or more	$1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ or less
U.S.A	compact soil	60cm or more	$1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ or less
Germany	clay layer	1.5m or more	$5.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ or less
France	clay layer	5m or more	$1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ or less
Netherlands	Mixed soil of low permeability soil and bentonite	-	-

2.2.3 차수공의 분류

본 절에서는 해상 폐기물매립장에서 이용되는 경우가 많은 불투수에 가까운 토양형 차수공, 차수시트공, 강재 차수공에 관해서 기술한다.

(1) 토양형 차수공

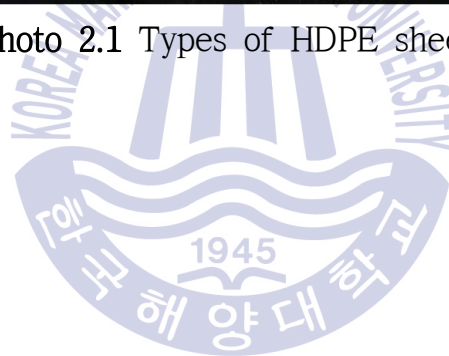
해상 폐기물매립장에서는 토양형 차수공이 중요한 역할을 담당하고 있다. 토양형 차수공이란 자연에 존재하는 점성토나 지반개량을 실시하여 투수성이 낮은 처리토를 이용하는 차수공이고, 천연재료이기 때문에 장기적인 내구성이 차수시트 등의 인공 물질에 비해 높다. 또한 일본의 해상 폐기물매립장은 충적지에 건설되는 경우가 많고, 점성토를 주된 성분으로 한 충적층 위에 정비되는 경우가 많아 토양형 차수공이 바닥 차수공으로 이용되는 경우도 많다. 그래서 해상 폐기물매립장 저면에 존재하는 점토층이 앞 절에서 기술한 차수공기준(층 두께 5m이상이고 투수계수 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 이하)을 만족하는 경우는, 점토층을 불투수성 지층으로서 보아 바닥 차수공으로 사용되고 있다. 매립에 따른 압밀침하 등에 의한 지반변형에 대해서도 불투수성 지층의 추중에 의해 차수성의 저하는 생기기 어려운 장점이 있다(渡部 洋一 et al., 2013). 다만 층 두께 결정시에는 불투수성 지층의 비균질성을 고려하여 여유를 두는 것이 바람직하다. 바닥의 지층이 차수공의 기준조건을 충족시키지 않는 경우에는 차수공 기준과 동등 이상의 차수성능을 갖도록 지반을 개량하거나 해저면 상에 토양형 불투수성 재료를 부설 또는 채움하여 인공의 불투수성 지층을 확보할 필요가 있다.

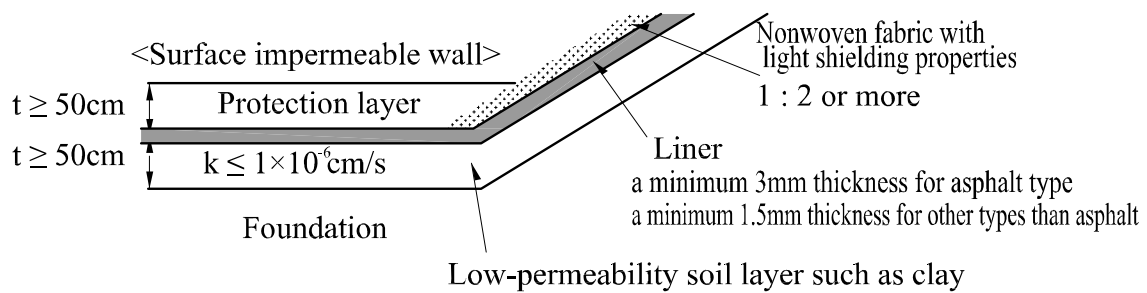
(2) 차수시트공

차수시트공은 차수공에 차수시트를 채택하는 공법이다. Photo 2.1에서 차수시트의 종류 사진을 나타내었으며, 차수성능을 유지하기 때문에 복층 구조가 채용되는 것이 일반적이다. 폐기물매립장의 저면에 불투수성 지층이 없을 경우 다음 요건을 갖춘 차수시트공(표면차수공) 또는 이와 동등 이상의 차수 효력을 가지는 것으로 규정되어 있다(Fig. 2.6 참조).

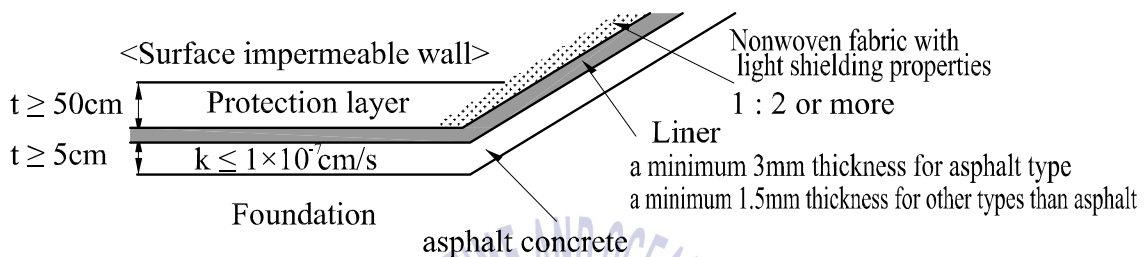


Photo 2.1 Types of HDPE sheets

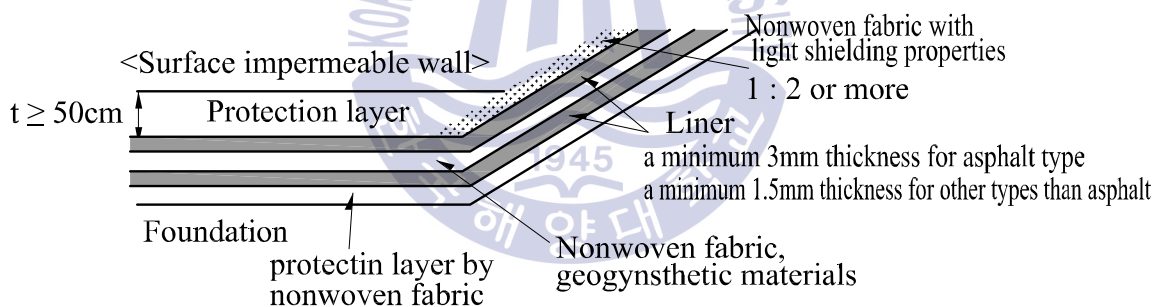




(1) 50cm thick low-permeability soil barrier layer with a saturated hydraulic conductivity no greater than $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ (or the equivalent to this) + liner



(2) 5cm thick low-permeability soil barrier layer with a saturated hydraulic conductivity no greater than $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ (or the equivalent to this) + liner



(3) Double liner on surface of nonwoven fabric layer

Figure 2.6 Some examples of bottom barrier system for the case of area without impermeable soil layer

육상 폐기물매립장에서는 2.3.2에서 말한 것처럼 불투수성 지반이 존재하지 않는 경우의 바닥 차수공으로 채용되는 경우가 많다. 한편 해상 폐기물매립장에서는 바닥 표면에 차수공을 설치하는 경우도 생각되는데 해상 시공의 어려움이나 측면 차수공과의 접합부가 차수의 약점이 되기 쉽다. 최근에는 차수시트의 재질로 비중이 해수에 비해 무거운 염화 비닐수지나 폴리에틸렌계 시트 등이 개발되어 사용되는 경우도 있다.

(3) 강재 차수공

강재 차수공이란 Photo 2.2와 같이 강널말뚝이나 강관널말뚝 부재의 이음을 서로 영합하여 연속적으로 타설되는 차수공이다. 강재 부재 자체는 불투수 재료이나 이음부는 강재를 타설하여 시공되므로 시공시 적당한 여유가 필요하다. 그러므로 이러한 이음부 틈에는 차수 처리가 필수적이다. 강재 차수공은 시공성, 비용의 관점에서 폐기물 매립 호안에 이용되는 경우가 많고 측면 차수공으로 고려할 수 있다(渡部 洋一 et al., 2006).

또 시공시의 강관널말뚝 부재의 불투수성 지층에서의 근입에 대해서는 차수공으로서 안정적으로 기능하도록 하기 위해서 적절한 근입장을 확보할 필요가 있다(WAVE, 2008). 불투수성 지층의 투수계수가 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 인 경우 유로장 5m이상을 확보할 필요가 있기 때문에 강관널말뚝 부재의 근입장은 2.5m이상이 요구된다(Fig. 2.7 참조).



Photo 2.2 Steel tubing sheet pile (STSP) cut-off wall

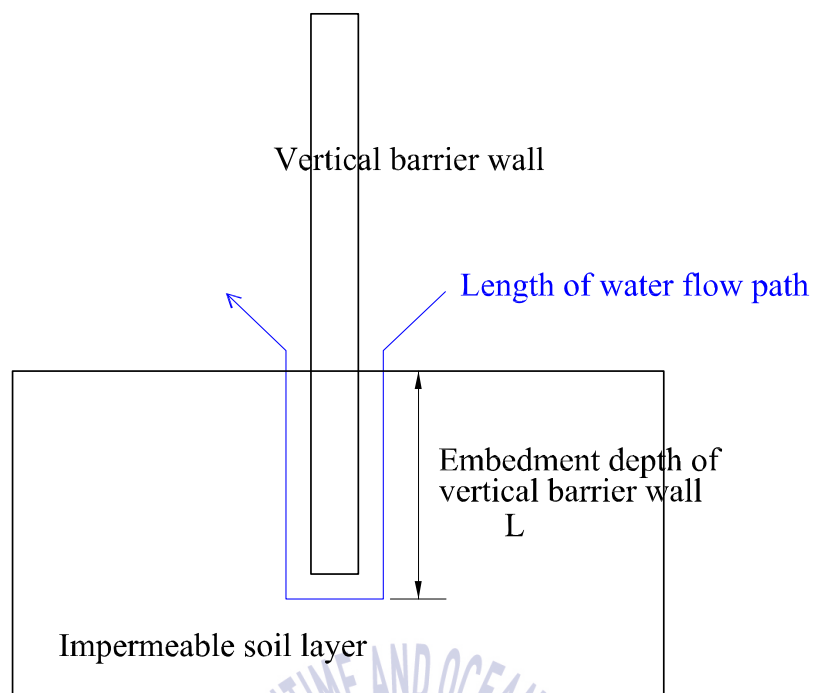


Figure 2.7 Embedment depth of vertical wall for preventing leakage



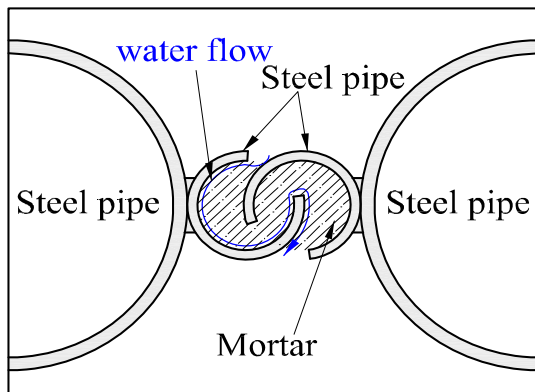
여기서 강재 차수공에 이용되는 강재 부재로부터 폐기물매립장 외부로 오염수가 누출되는 것은 생각할 수 없지만 강부재를 결합할 때 형성되는 이음부에서는 물길이가 발생할 우려가 있다. 강부재의 부식에 의해 이음부의 간격이 변화하거나 충전제 접착성이 감소하기 때문이다. 또 근입부에도 빈틈이 생겨 누수가 생길 수 있지만 강재 차수공 전체의 차수성능은 이음 부분의 차수성능에 크게 의존한다고 볼 수 있다. 따라서, 강재 차수공의 시공에서는 이음부의 차수성능을 높이는 대책을 수립하여야 한다(渡部 洋一 et al., 2006). 강부재의 이음 부분에 관해서는 차수성능을 향상시키기 위해서 다양한 형상의 이음 및 충전재가 이용·제안되었으나, 강널말뚝을 이용한 지수 방법으로 보급되어 있는 것이 지수재이며 강관널말뚝에는 모르타가 이용되는 경우가 일반적이다(渡部 洋一 et al., 2006).

첫째로 강널말뚝에 이용되는 충전재로 대표적인 것이 팽윤성 지수재이다(稻積 真哉 et al., 2012). 팽윤성 지수재는 열가소성 탄성중합체(elastomer, 천연고무·합성고무)를 모재로 하는 고흡수성 폴리머, 충전제 및 용제를 배합한 유동성을 갖는 지수재(시트형 혹은 액상형)이며, 팽윤막(팽윤한 팽윤성 지수재막)에서 추출되는 물은 특정 유해 물질에 대해서 토양오염 대책법에 근거하는 지하수 환경기준을 충족시키고 있다. 또 강부재의 이음 내부에 이용되어 도포 후에 용제가 휘발하여 탄성의 굳은 막을 형성하고, 강재 차수벽 타설 후에 물이나 흙속의 물을 흡수·팽윤하여 이음 내부의 간극을 막는다(Photo 2.3참조). 이로써 이음부는 차수성능의 향상을 꾀할 수 있다. 게다가 팽윤성 지수재는 모르타 등에 비해 충분한 유연성을 가지고 있어 강재 차수벽의 탄성이나 변형성도 향상시킬 수 있다. 즉, 팽윤성 지수재에 대해서는 다양한 조건 하에서 실내·현장 시험이 행해지고 있고, 충전제(차수 처리재)로서의 특성·성능이 정량적으로 평가되어 있다. 예를 들면, 수두차가 40m이하인 경우, 팽윤성 지수재를 도포한 이음은 차수공 기준 ($k_e \leq 1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$)을 달성할 수 있다(稻積 真哉 et al., 2005, 2007).

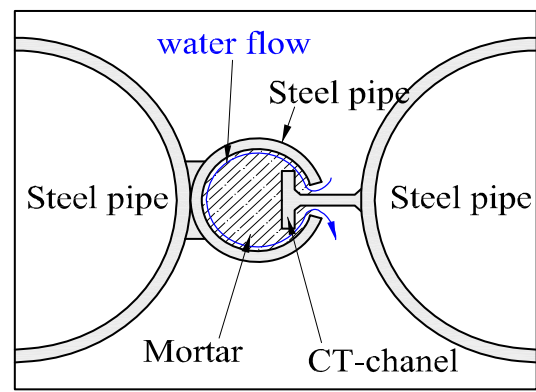


Photo 2.3 States of swellable waterproofing material before swelling (left) and after swelling (right)

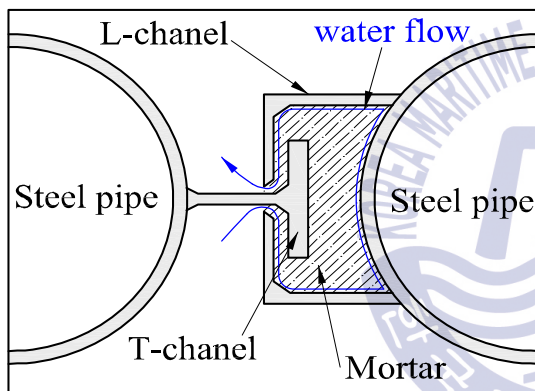
다음으로 강관널말뚝에 관한 이음으로서 Fig. 2.8에서는 P-P, P-T 및 L-T 이음을 나타내고 있다. 이들의 이음에 대한 차수처리로서, 강관널말뚝 타설 후에 이음 내부로 저투수성 포대 모르터를 충전하여 이음부의 투수계수를 저하시키는 공법이 일반적으로 실시되고 있다. 여기서 충전한 포대 모르터와 이음 부재의 접촉면을 따르는 물길의 발생이나 모르터의 불균질한 충전성이 문제로 거론되고 있다(稻積 真哉 et al., 2006). 또 이들의 이음에서 신뢰성이 낮은 원인은 강관널말뚝의 타설에 따른 이음부에 엇물림이나 맞물림 등이 발생하기 때문이며 건전한 상태의 이음 형상이 유지되지 않는다는 것이 지적되고 있다. 그래서 강관널말뚝 타설 후에 차수처리를 실시하더라도 목표하는 수준의 차수성능을 발휘하기 어렵다. 상기와 같은 과제를 해결하기 위해, P-T이음의 내부 공간에 모르터의 주입과 함께 누출방지 고무판을 설치하고, 슬릿 강관을 이용한 개량형 P-T이음이 개발되어 있다(沖 健 et al., 2003). 한편으로, 폐기물매립장의 유지관리·보수의 측면에서 보면 이들의 차수처리에서는 시공불량이나 열화 등에 의해 물길이 형성되었다고 해도 심도 방향으로 모르터가 충전되고 있기 때문에 물길이 발생하는 곳의 발견은 어렵다. 또 물길의 발생위치를 센서로 발견하였다고 해도 물길에 대한 보수작업은 어려우므로 사용시에는 이러한 점들에 유의하여야 한다.



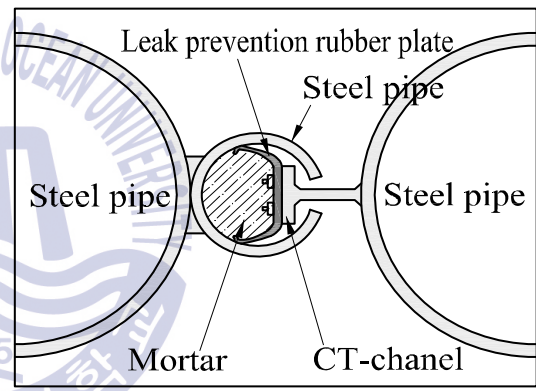
(a) P-P Fitting



(b) P-T Fitting



(c) L-T Fitting



(d) Improved type P-T Fitting

Figure 2.8 Fittings with various shapes in steel water barrier walls

2.3 시공사례

2.3.1 동경만 해상 폐기물매립장

동경만의 해상 폐기물매립장은 중앙방파제 내측매립장을 1961년에 최초 착공하여 외측매립장 조성을 거쳐, 마지막으로 착공된 신해면폐기물매립장 공사가 진행 중이다. 동경만중앙방파제의 내측매립장은 지진이나 태풍에 의한 쓰나미 피해로부터 동경항만을 보호하기 위한 목적으로 설치된 방파제였지만, 동경도내 23구(區)의 생활폐기물이 증가함에 따라 이를 처리하기 위하여 단순히 매립을 하였으며, 현재는 중앙방파제 외측매립장과 신해면폐기물매립장에 생활폐기물을 소각하여 매립하고 있으며, 매립완료 후에는 공원녹지, 스포츠시설 등으로 활용될 계획으로 매립 진행 중이다(Figs. 2.9~2.10).



Figure 2.9 Plans for placing Tokyo Bay bouncing offshore waste landfill



Figure 2.10 Tokyo Bay offshore waste landfill site reclamation status (2018)

Cross Section (Double steel-tubing sheet pile)

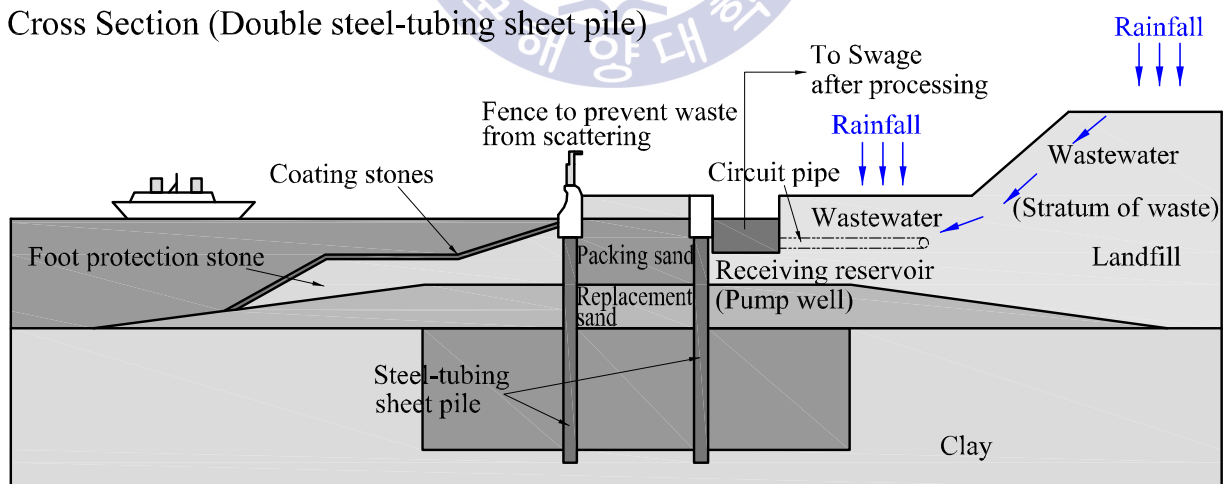


Figure 2.11 Outer protection structure (Tokyo Bay offshore waste landfill site)



Figure 2.12 Exterior revetment construction (Tokyo Bay offshore waste landfill site)

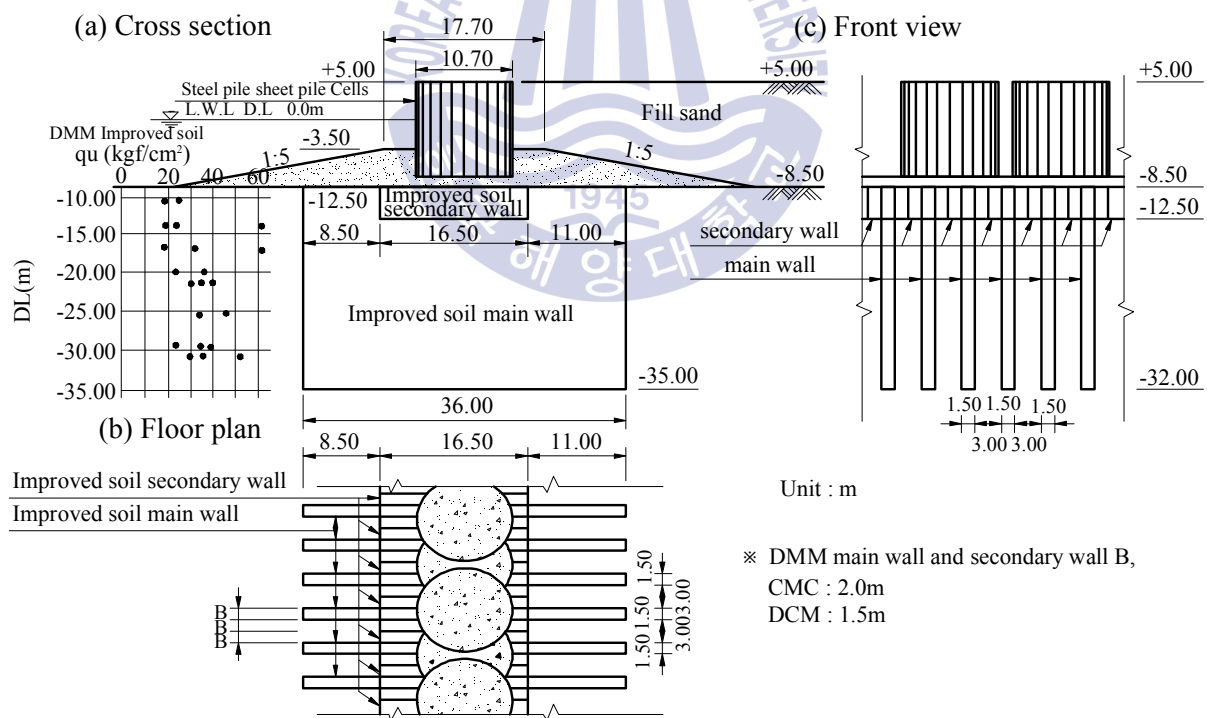


Figure 2.13 Revetment structure drawing of intermediate partition (Tokyo Bay offshore waste landfill site)

중앙방과제의 폐기물매립장 건설위치의 수심은 약 5~10m로서 해저면에서 -35m 부근까지는 N치가 0인 슬러지 및 점토실트층이 퇴적되어 있으며, 층적층심도는 -40 ~ -50m에 달한다.

Figs. 2.11, 2.12에 외측 호안구조물과 중간 칸막이 구조물에 대해 나타내었다. 지반개량공법은 기초지반의 연약한 점성토를 제거하고 화강풍화토로 치환하는 굴착치환공법과 폐기물 매 SCP(Sand Compaction Pile)을 병행하여 시공하였다. 동측 매립장의 일부 지역에서는 중간칸막이 호안의 기초지반 개량공법으로 심층혼합처리공법(DMM)이 적용되었다.

Fig. 2.12의 외곽구조물의 경우에는 강관널말뚝 타설 후에 과도한 변형을 방지하기 위하여 일정 간격으로 널말뚝 격벽을 향타하고 타이로드를 설치하였으며, 강관 내부에 모래채움을 하였다. 강관널말뚝의 상부에 덮개 콘크리트를 파랑조건, 안전성 등을 고려한 후 대형 거푸집을 사용하여 -0.5m~+4.5m 높이로 타설하였다.

2.3.2 오사카만 해상 폐기물매립장

오사카만 해상 폐기물매립장 계획인 Phoenix 계획은 오사카만 권역의 대도시에서 발생하는 폐기물을 처리함과 동시에 새로운 매립장을 활용하여 지역발전에 기여하는 것을 목적으로 1982년 시작되었다. Phoenix 계획은 전체 4개의 매립장으로 구성되어 매립면적은 약 500ha이며, 폐기물 처리가능 용량은 총 7,600만 m^3 으로 계획되었다.

폐기물 매립호안의 구조선정은 자연조건, 폐기물의 매립처리계획, 매립지의 토지이용, 항만 이용계획 등을 고려한 후 시공성, 공사비, 공기, 유지관리의 난이도 등을 종합적으로 검토하여 결정되었다. Phoenix계획 중에서 가장 먼저 시공하여 매립을 수행한 아мага사키오키 매립장의 경우를 예를 들어보면, 매립완료 후에 부두용지, 항만관련용지, 도시재개발용지, 녹지 등의 토지이용을 목적으로 하고 있다.



(a) Construction plan



(b) Landfill photo



(c) Amagasaki (Nov. 2017)



(d) izumiotsu (Nov. 2017)



(e) Kobe (Nov. 2017)



(f) Osaka (Nov. 2017)

Figure 2.14 Osaka Bay offshore waste landfill site construction plan and construction status

Figs. 2.15, 2.16에 아마가사키오키 매립장의 호안 평면도와 단면도를 나타내었다. 외주 호안의 연장은 4,154m, 내호안 1,043m, 중간칸막이 시설로서 472m으로, 관리형 구획과 안정형구획을 중간칸막이로 구분하여 시공하고 있다.

폐기물매립장 형식은 매립폐기물의 종류에 따라 일반적으로 안정형과 관리형으로 구분되며, 안정형매립장은 준설토, 건설잔토, 산업폐기물 중에서 폐플라스틱류, 고무, 금속, 유리, 폐콘크리트, 건축폐기물 등 주변 환경에 영향을 미칠 우려가 거의 없는 폐기물을 매립하는 경우로서 매립공간을 지하수와 차단할 필요가 없을 때 적용된다. 그리고 관리형 매립장은 안정형매립장의 폐기물 이외의 산업폐기물 및 가정쓰레기 등 일반폐기물을 매립대상으로 침출수가 주변 환경에 영향을 미치는 폐기물을 대상으로 하며, 차수공 및 침출수의 집수설비와 처리시설 등을 설치한 구조이다. Phoenix계획 지역의 폐기물매립장은 폐기물의 종류에 따라서 안정형 및 관리형구획으로 구분되어 그 경계에는 2중시트파일 구조의 중간칸막이 시설이 설치되었다. 특히 소각재 및 슬러지 등의 폐기물을 매립하는 관리형 구획은 케이션 배면에 폐기물의 유출 및 오수의 침수방지를 위해 시트파일로 차수성호안이 설치되고, 매립에 의해 발생된 매립장내의 침출수는 생물처리 및 응집침전방식으로 처리 후에 외해에 방출되고 있다.

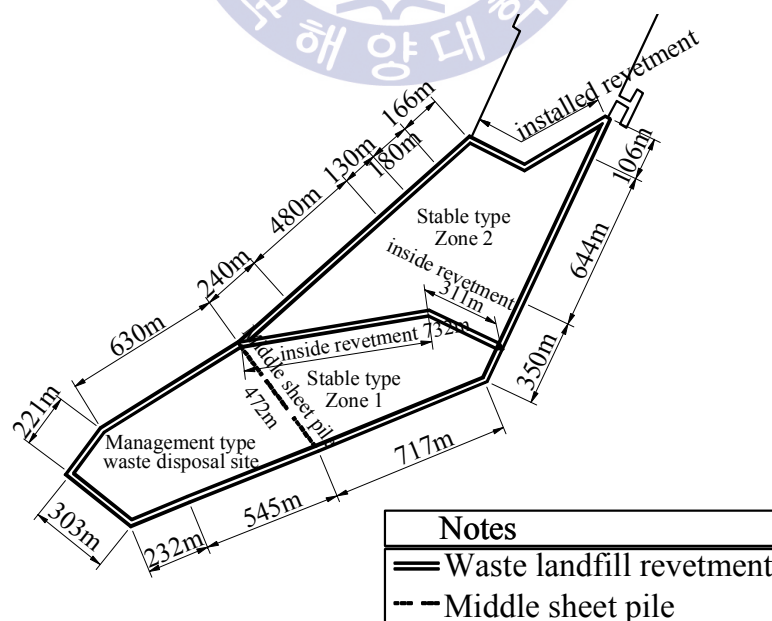


Figure 2.15 Revetment plan view of Amagasaki landfill

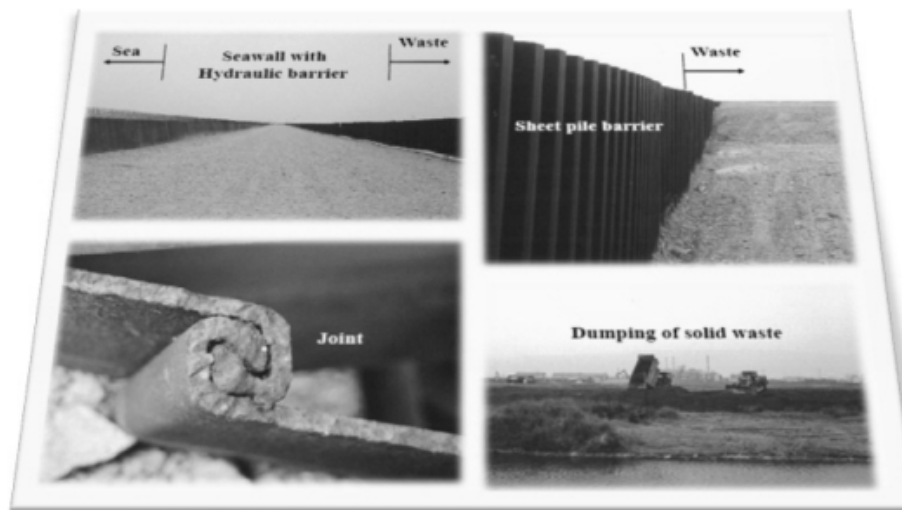


Figure 2.17 Double STSP of revetment(Chae et al., 2003)

2.3.3 다차바나만의 해상 폐기물매립장

Figs. 2.18, 2.19에는 토쿠시마현 다차바나만(灣) 매립장의 시공중 전경 및 단면도를 나타내었다. 다차바나만 매립장은 사석식 경사호안의 법면에 차수시트가 일부 손상되어도 차수기능을 할 수 있도록 Fail-safe를 고려하여 2장의 차수시트를 설치하고 차수시트가 파손되지 않도록 중간 보호층용으로 빈배합의 시멘트 처리토를 이용하였다.



Figure 2.18 Tachabana Bay landfill under construction (Chae et al., 2003)

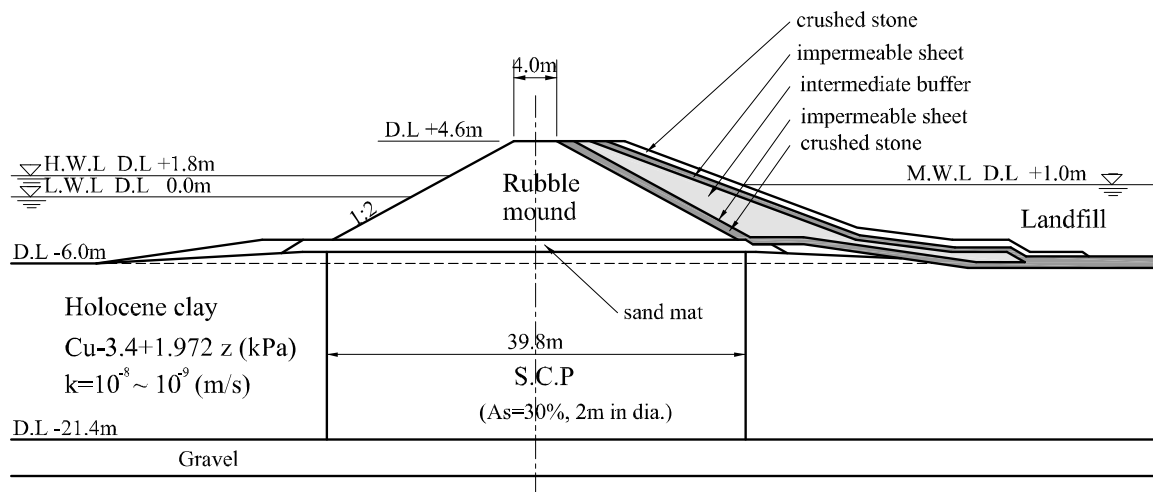


Figure 2.19 Rubble mound type inclined revetment cross section
(Tachabana Bay Offshore waste landfill)

또한, 사전에 호안 주변의 변형해석을 수행하여 지반변형에 따른 시트의 신장률이 시트 파손에 대해 충분히 안전함을 확인하였다. 차수시트 시공은 다음과 같다(Figs. 2.20, 2.21).



Figure 2.20 Joining operation of HDPE(Chae, et al., 2003)



Figure 2.21 Protection method of the surface of the first HDPE
(Poor blended cemented soil) (Chae, et al., 2003)

- 1) 사용된 차수시트는 PVC 재질이며 공장에서 폭 2.03m, 두께 3.0 mm, 길이 60 m의 시트를 3장씩 접합한 폭 6m 시트를 현장 반입한다.
- 2) 작업선 위에서 6m 폭의 시트 6장을 0.8m의 간격으로 접합하기 위해서 폭 1m의 시트(wrap sheet)을 부착하여 폭 40m의 차수시트를 완성한다.(중첩 폭100mm에 대한 접합 폭 25mm 이상)
- 3) 폭 40m의 2장 시트를 부착한 시트 표면에 부표를 연결하여 수면에 떠오르게 한다.
- 4) 시트의 한쪽 끝부분을 호안 상부에 고정하고, 해면에 떠있는 시트의 부표를 제거하여 수중에 가라앉힌다. 폐기물 매립 호안의 차수성능이 중요하므로 차수성능 및 차수시트의 시공 중에 주의를 해야 한다. 차수시트는 물보다 밀도가 높은 재질이므로 호안의 내부수위보다 외부수위가 높아지면 사석 호안(투수성이 높음)을 통하는 용수가 발생하여 양압력에 의해 시트의 떠오르는 경우가 발생하므로 시공에는 조위에 대한 고려가 필요하다. 또한 시트가 파손되지 않도록 1번째의 시트의 위에 빈배합의 시멘트 처리토를 타설하며, 필요시에는 측면 차수공뿐만 아니라 저면 차수공과 일체성을 갖는 차수시트를 설치하는 경우도 있다.

2.3.4 싱가포르 세마카우 해상 폐기물매립장

싱가포르는 육상 공간이 매우 부족하기 때문에 육상에서 발생한 쓰레기를 처분하기 위하여 싱가포르 남쪽 8km 해상에 350ha 면적의 세마카우(Semakau) 해상 폐기물매립장을 건설하여 1999년부터 운영 중에 있으며 하루 약 2천톤의 소각재와 불연성폐기물을 매립하고 있다. 세마카우 해상 폐기물매립장은 전체 면적의 1/2 이상을 낚시, 조류관찰, 자전거도로, 캠핑장 등 관광목적 생태공간으로 구성되어 개방, 운영되고 있다. 이와 같이 소각재 매립장을 활용하여 새로운 생태공간으로 조성한 것을 두고 뉴욕타임즈를 비롯한 세계 많은 언론에서는 단순한 매립이 아닌 생태친화적인 해양공간 창조로 평가하기도 하였다.



Figure 2.22 View of Singapore's Semakau Offshore Waste Landfill

제 3 장 침투·이류 분산(확산)의 이론 및 해석방법

3.1 침투·이류 분산(확산)의 개념

해상 폐기물매립장에는 매립된 폐기물에서 발생한 침출수가 매립장 바깥 해역으로 누출될 위험이 존재한다. 이러한 침출수에는 폐기물로부터의 오염물을 포함하고 있을 가능성이 크다. 따라서 이러한 침출수가 해역으로 누출되지 않도록 해상 폐기물매립장에는 차수공이 설치되어 있으며, 차수공은 주변 환경의 보호에 중요한 역할을 하고 있다.

침출수에 의한 오염물의 이동은 주로 이류와 확산 및 분산에 의해 발생하는 것으로 생각된다. 이류에 의한 오염물 이동은 물에 녹은 오염물이 물과 함께 이동하는 현상이다. 확산에 의한 오염물 이동은 오염물의 농도구배에 의한 브라운 운동에 의해 오염물 농도가 균일화 되려고 퍼져가는 현상(Fig. 3.1)이며, 분산에 의한 오염물 이동은 유속의 불균질성에 의해 오염물이 퍼져 나가는 현상(Fig. 3.2)이다. 지반내 오염물 이동은 주변 환경과 지반 및 차수공의 특성에 따라 이류, 분산, 확산에 의한 오염물 이동을 적절히 반영하여야 한다. 특히 차수 부분의 투수성이 높은 경우에는 이류의 영향이 상대적으로 크고, 투수성이 낮아 침투유속이 느린 경우 확산과 분산의 영향을 상대적으로 큰 영향을 미친다(Devlin & Parker, 1996; Neville & Andrews, 2006).

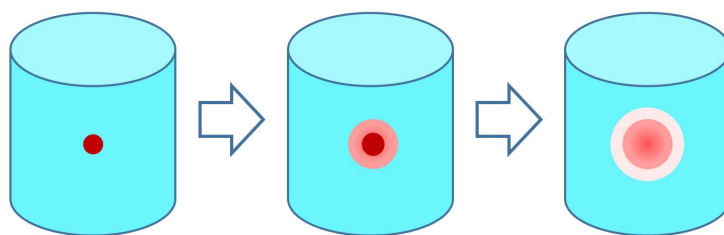


Figure 3.1 Diffusion of contaminant(Hwang, et al., 2018)

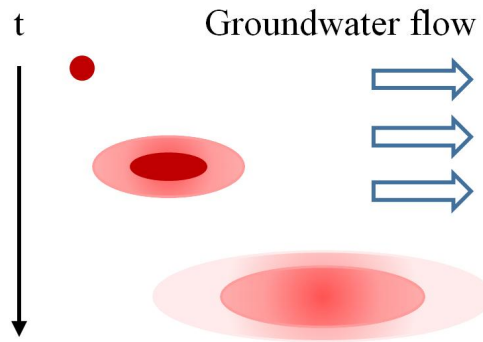


Figure 3.2 Dispersion of contaminant within the flow system(Hwang, et al., 2018)

3.2 침투·이류 분산 해석 이론

3.2.1 지배방정식

해상 폐기물매립장에서 무기계의 오염물을 포함하는 침출수의 누출 및 오염물의 거동은 침투뿐만 아니라 이류 및 분산 현상을 동반한다. 따라서 해상 폐기물매립장의 차수공을 대상으로 한 수치해석을 수행하기 위해서는 침투와 이류 및 분산 현상을 정확하게 재현할 필요가 있다. 또한 해상 폐기물매립장은 육상 폐기물매립장과 달리 조석 등 외부 조건 등의 영향도 고려하는 것이 바람직하다. 동시에 폐기물 매립 호안은 점토층 및 강제 차수공과 뒷채움 모래 등 복합적인 구조로 건설되고 있기 때문에 이들도 고려하여야 한다. 이러한 복잡한 가정 조건을 고려하여 침출수의 누출 및 유해물질의 거동을 평가하기 위해 다양한 분석 방법이 존재한다.

본 연구에서는 지반 분야의 다양한 문제에 널리 쓰이는 2차원 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 침투·이류 분산 해석을 수행한다. 우선 침투해석을 이용하여 해상 폐기물매립장에서의 간극수압분포 및 유속분포를 계산하고, 이를 오염물 이동해석과 연계하여 해상 폐기물매립장에서의 오염물 거동 및 농도 분포를 계산한다.

2차원 연속체로 가정한 포화·불포화 지반에서의 간극수 흐름 및 간극수압 분포에 대한 지배방정식은 아래의 식(3.1)과 같다. 해석프로그램인 SEEP/W는 이러한 지배방정식에 대하여 Galerkin의 가중잔여법(weighted residual method)을 이용하여 유한요소로 정식화하였다(GEO-SLOPE, 2012a).

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.1)$$

여기서, H 는 전수두[L], k_x 는 수평방향 투수계수[LT⁻¹], k_y 는 연직방향 투수계수[LT⁻¹], Q 는 단위체적, 단위시간 당 소스(source)항[T⁻¹], θ 는 체적함수비[-], t 는 시간[T]을 각각 나타낸다.

또한, CTRAN/W에 이용된 지반내 오염물 이동에 대한 지배방정식은 아래 식과 같다(GEO-SLOPE, 2012b).

$$\left(\theta + \rho_d \frac{\partial S}{\partial C}\right) \frac{\partial C}{\partial t} = \theta D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda \theta C - \lambda S \rho_d \quad (3.2)$$

여기서, θ 는 체적함수비[-], C 는 오염물의 농도[ML⁻³], ρ_d 는 흙의 건조단위 밀도[ML⁻³], S 는 흡착비[-], t 는 시간[T], D 는 수리분산계수[L²T⁻¹], U 는 Darcy의 유속[LT⁻¹], λ 는 방사능 물질의 붕괴계수[T⁻¹]를 각각 나타낸다.

식(3.2)의 좌변은 오염물의 농도 변화에 따른 유체 및 흡입자 내에 저장된 오염물의 양을 나타내고, 우변의 첫 번째 항은 분산에 의한 오염물 이동을, 두 번째 항은 이류에 의한 오염물 이동을, 세 번째 항과 네 번째 항은 각각 유체 및 흡입자 내에서 붕괴된 오염물의 질량손실을 각각 나타낸다.

3.2.2 해석프로그램

본 연구의 해석에서는 포화·불포화 상태의 침투 및 이류 분산에 따른 지하수 흐름과 용질의 이동을 분석할 수 있는 유한요소해석 프로그램 SEEP/W 및 CTRAN/W를 사용하였다. SEEP/W 및 CTRAN/W는 캐나다 Geo-Slope사에서 개발한 범용 지반 유한요소해석 프로그램 패키지인 GeoStudio의 지하수 흐름 및 오염물 이동을 분석하기 위한 각각 하나의 해석모듈이다. SEEP/W는 포화·불포화 상태의 흡 및 암반과 같은 다공질 지반 내의 지하수 침투흐름과 과잉간극수압의 소산문제를 해석하기 위한 프로그램으로 정상상태해석(steady-state analysis) 및 비정상상태해석(transient analysis)을 수행 할 수 있다. 또한, CTRAN/W는 다공질 지반을 통한 오염물의 이동을 모사하기 위한 프로그램으로 침투에 의한 이류, 오염물 농도차 및 지반의 역학적 특성에 따른 분산, 흡의 흡착, 방사성 물질의 붕괴를 고려할 수 있다. CTRAN/W는 간극수 내에 녹아있는 오염물의 이동을 계산하기 위하여 SEEP/W로부터 계산된 지반내 유속장을 이용한다.

3.3 해석모델 및 해석조건

3.3.1 해석모델

해상 폐기물매립장의 호안 형식은 주로 강널말뚝식 호안, 경사식 호안, 중력식 케이슨 호안이 사용된다. 또는 이들을 조합한 호안 형식이 사용된다. 국내에는 해상 폐기물매립장 사례가 없으므로 2.3절의 해외 시공사례의 단면 중 대표적인 두 개 단면을 해석 모델로 선정하였다. 첫 번째는 2중 연직벽체 구조(Fig. 3.3)로서 일본의 동경만 해상폐기물매립장을 참고하였다(Kwon et al., 2012). 두 번째는 사석식 경사제식 차수호안(Fig. 3.4)으로 일본 다치바나만 해상폐기물매립장에 적용된 경사제식 차수호안단면을 참고하여 선정하였다(Chae et al., 2011; Kwon et al., 2012).

(1) 2중 연직벽체 호안

호안 외곽의 측면벽체는 해일, 쓰나미, 조수, 파랑, 해류 등의 외력에 대해 매립지를 보호하기 위한 호안 구조물이며, 내측의 측면벽체는 폐기물매립장의 침출수 및 오염물질이 해양으로 유출되지 않도록 하기 위한 차수벽체이다.

지반조건은 하부지반이 바닥차수층의 차수성능을 만족시키는 점토층이 존재하는 단층지반 조건(Fig. 3.3)으로 가정하여 침투 및 오염물이동특성을 분석하였다. 호안 구조물 하부에는 구조물 설치를 위해 지반개량이 적용된 것으로 가정하여 해석하였다.

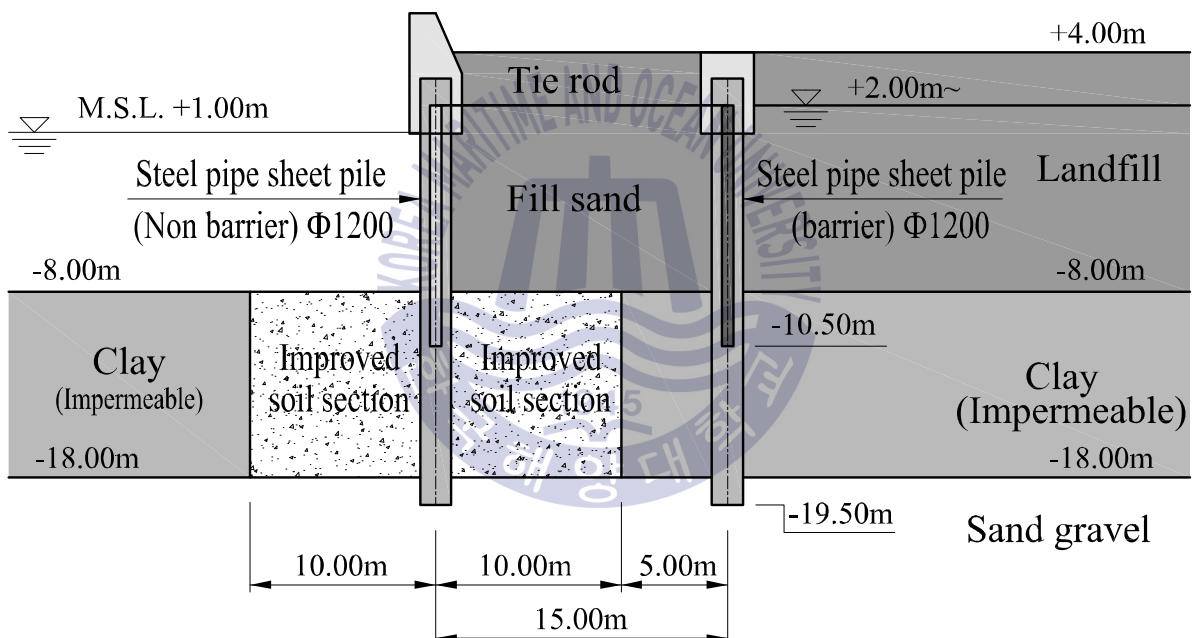


Figure 3.3 Cross section and soil condition of double STSP type quay wall

2중 강관널말뚝식 해석 모델의 지반 및 구조물에 대해 침투·이류 분산 해석에 이용된 각 재료 물성치는 Table 3.1과 같다. 이러한 재료 물성치는 해상 폐기물매립장의 침투·이류 분산 해석에 대한 연구문헌에 제시된 값을 반영하였다(Kwon et al., 2012). 분자 확산계수는 카울린 점토를 이용한 추정 간극비의 차이에 따라 $6 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ ~ $2 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ 를 나타내며, 지반내 무기화합물질의 확산계수에 대해 $8 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ ~ $6 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ 정도의 값이 타당한 것으로 보인

다. 또한 침투·이류 분산 해석을 이용한 해상 폐기물매립장의 유해물질 누출 평가에 관한 연구에서는 각 지층의 분자 확산계수는 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$ 가 이용되고 있다. 그 외 해석에 필요한 기타 가정 조건은 다음과 같다.

- 1) 단위 계산간격은 0.1년, 분석기간은 50년으로 하고 데이터는 1년마다 저장한다.
- 2) 폐기물층과 해역의 수두 차이는 100cm로 한다.
- 3) 유해물질의 상대농도는 폐기물층은 $C = 1.0$, 해역은 $C = 0$ 으로 자유 유출 경계로 한다.

Table 3.1 Material properties used in advection-dispersion analysis

Item	Steel tubing Sheet Pile (STSP)		Fill sand	Landfill	Clay	Improved soil section	Sand gravel
	Barrier wall	wall					
horizontal hydraulic conductivity k_h (cm/s)	parameter	1×10^{-1}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	parameter	5×10^{-4}	1×10^{-1}
vertical hydraulic conductivity k_v (cm/s)	parameter	1×10^{-8}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	parameter	5×10^{-4}	1×10^{-1}
porosity n (-)	0.2	0.2	0.3	0.7	0.2	0.3	0.4
longitudinal dispersivity α_L (cm)	100	100	100	100	100	100	100
transverse dispersivity α_T (cm)	10	10	10	10	10	10	10
coefficient of molecular diffusion D^* (m^2/sec)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
specific storage M_v (1/kPa)	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}

※ parameter는 매개변수로서 상세조건은 Tables 3.3~3.5 참조

검토단면으로 참고한 다치바나만 해상매립장은 사석식 경사호안의 법면에 2층의 차수시트를 설치하고 각 시트 사이에 중간 보호층을 두어 차수시트가 파손되지 않도록 적용된 사례이다.

- 1) 단위 계산간격은 0.1년, 분석기간은 50년으로 하고 데이터는 1년마다 저장한다.
- 2) 폐기물층과 해역의 수두 차이는 100cm로 한다.
- 3) 유해물질의 상대농도는 폐기물층은 $C = 1.0$, 해역은 $C = 0$ 으로 자유 유출 경계로 한다.
- 4) 건전한 차수시트의 투수계수는 $1.6 \times 10^{-11} \text{cm/s}$ 로 하였다(Kwon et al., 2012).



Table 3.2 Material properties of each soil and structure element

Item	Mid protection	Fill sand	Landfill	Clay	Improved soil section	Rubble mound	Sand gravel
horizontal hydraulic conductivity k_h (cm/s)	parameter	1×10^{-4}	1×10^{-3}	parameter	5×10^{-4}	1×10^{-0}	1×10^{-1}
vertical hydraulic conductivity k_v (cm/s)	parameter	1×10^{-4}	1×10^{-3}	parameter	5×10^{-4}	1×10^{-0}	1×10^{-1}
porosity n (-)	0.4	0.2	0.7	0.2	0.3	0.4	0.4
longitudinal dispersivity α_L (cm)	100	100	100	100	100	100	100
transverse dispersivity α_T (cm)	10	10	10	10	10	10	10
coefficient of molecular diffusion D^* (m ² /sec)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
specific storage M_r (1/kPa)	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}

※ parameter는 매개변수로서 상세조건은 Tables 3.6~3.8 참조

3.3.2 해석조건

해상 폐기물매립장의 가정한 대표단면에 대하여 2중 연직벽체 구조일 경우에는 매개변수로 바닥 차수시스템의 두께와 투수계수가 있으며, 측면 차수시스템의 두께, 투수계수 및 불투수성 지반으로의 차수처리 깊이의 변화를 통해 최소기준을 제시하고자 하였다. 또한, 경사제식 호안의 경우 바닥 차수시스템과 차수시트의 불투수성 지층과의 설치범위를 매개변수로 설정하고, 차수시트 손상시에 대해서도 고려하였다. 이러한 상세 해석조건은 다음과 같다.

(1) 2중 연직벽체 호안

측면 차수시스템의 두께, 투수계수, 경계에서의 누출을 방지하기 위해 바닥 차수시스템으로 근입시킨 차수처리 깊이에 대한 최소기준을 제시하기 위하여 측면차수공의 두께, 투수계수, 차수처리 깊이는 조건에 따라 변화하는 것으로 하였다. 또한 바닥 차수시스템은 해상 폐기물매립장의 특성을 반영하여 기본적인 불투수성 해저 점성토 지반을 고려하고, 이에 대한 투수계수 및 지층 두께에 대한 최소기준을 제시하기 위하여 각각의 조건을 변화시켜 해석을 수행하였다.

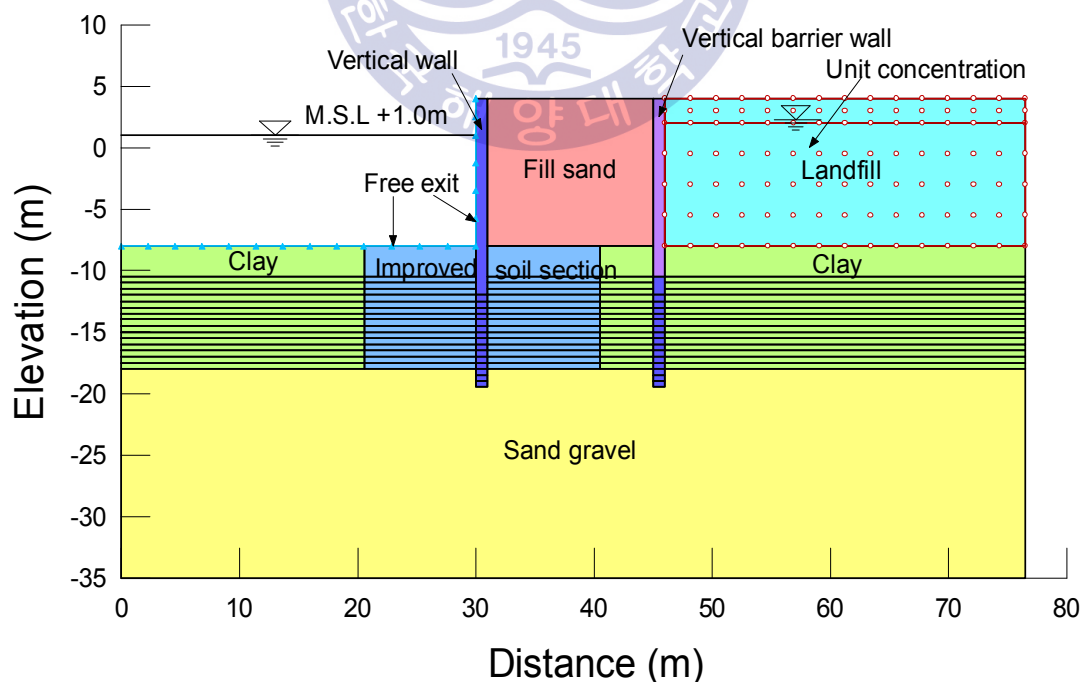


Figure 3.5 Numerical model of contaminant transport analysis in vertical barrier wall type waste landfill

바닥 차수시스템으로 이용된 불투성 지층과 측면 차수시스템으로 이용된 연적벽체의 각 기준항목에 대한 차수성능 평가를 위한 매개변수 해석을 위하여 이용된 해석 case를 Table 3.3 ~ 3.5에 나타내었다.

Table 3.3 Parametric analysis cases with different hydraulic conductivity and thickness of impermeable soil layer for vertical barrier wall type landfill

Embedded depth of vertical barrier wall in impermeable soil layer for preventing leakage(cm)	Hydraulic conductivity of impermeable soil layer, k(cm/s)			Thickness of impermeable soil layer (cm)
250	1×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-7}	250
				300
				350
				400
				450
				500
				550
				600
				650
				700
				750
				800
				900
				1000

Table 3.4 Parametric analysis cases with different hydraulic conductivity and thickness of vertical barrier wall for vertical barrier wall type landfill

Embedded depth of vertical barrier wall in impermeable soil layer for preventing leakage(cm)	Hydraulic conductivity of vertical barrier wall, k(cm/s)			Thickness of vertical barrier wall (cm)
250	1×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-7}	10
				20
				30
				50
				80
				100
				150
				200

Table 3.5 Parametric analysis cases with different hydraulic conductivity of impermeable soil layer and embedded depth of vertical barrier wall in impermeable soil layer for vertical barrier wall type landfill

Thickness of impermeable soil layer (cm)	Hydraulic conductivity of impermeable soil layer, k(cm/s)	Embedded depth of vertical barrier wall in impermeable soil layer for preventing leakage(cm)
500	1×10^{-5}	50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450
	1×10^{-6}	50, 80, 100, 150, 200, 250, 300
	1×10^{-7}	25, 50, 100, 150, 200, 250

해상 폐기물매립장의 특성상 해역의 조석의 영향에 따른 조위변동이 발생하게 되므로 이를 고려한 비정상류 하에서의 차수성능을 검토할 필요가 있다. 정상류 하에서의 매개변수해석에 의한 차수성능평가 결과를 반영한 조건으로 조위변동을 고려한 차수시스템의 차수성능을 평가하고, 정상류 하에서의 해석 결과와 비교하였다.

또한, 앞에서는 폐기물층과 해역의 수두차이를 100cm로 하여 폐기물층의 수두가 높은 것으로 가정하였으나, 폐기물층 수두가 해역의 수두와 같거나 낮을 경우에 대해서도 침투·이류 분산해석을 수행하여 관리수위에 대하여 제안하였다.

(2) 경사제식 호안

측면 차수시스템과 동일하게 바닥 차수시스템으로 해상 폐기물매립장의 특성을 고려한 기본적인 불투수성 해저 점성토 지반을 고려하고, 이에 대한 투수계수 및 지층 두께에 대한 최소기준을 제시하기 위하여 각각의 조건을 변화시켜 해석을 수행하였다. 차수시트가 설치된 해상 폐기물매립장 호안에서 해저지반을 통한 침투 및 오염물질 이동특성에 대해 침출수 유출방지 기능을 충분히 발휘하면서도 경제적인 차수시트 설치범위를 도출하기 위하여 차수시트의 불투수성 지층과의 설치범위(㉠)를 변화시켜 해석을 수행하였다. 이러한 해석 모델은 Fig. 3.6에 제시하였다.

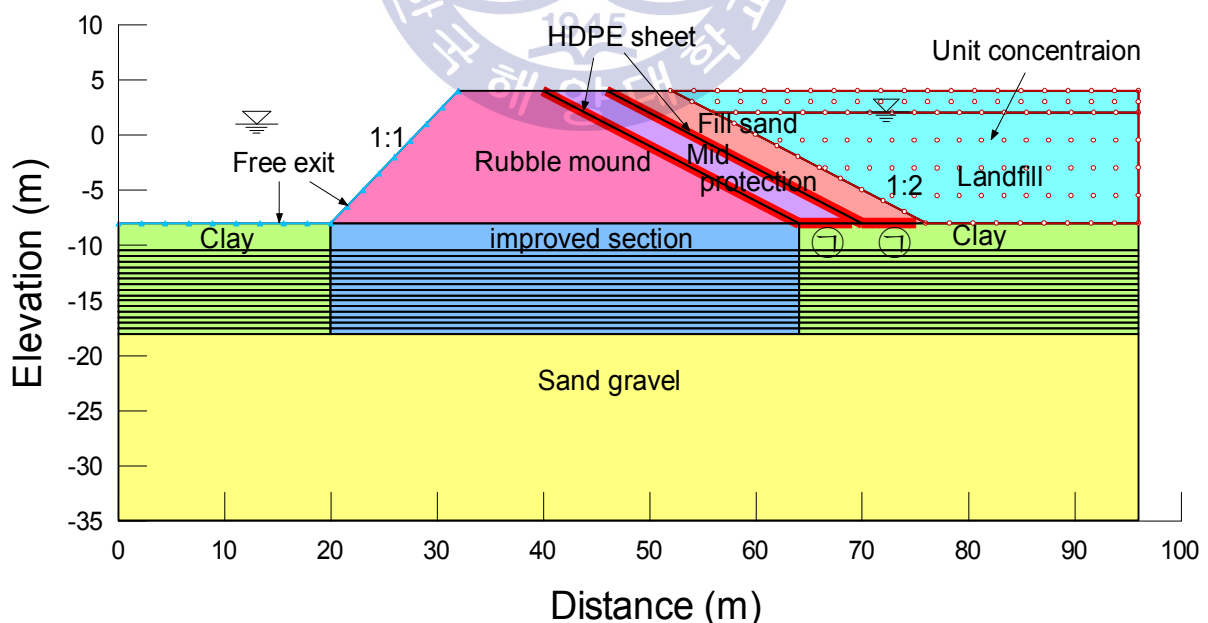


Figure 3.6 Numerical model of contaminant transport analysis in rubble mound type waste landfill

바닥 차수시스템으로 이용된 불투성 지층과 차수시트의 해저지반으로의 연장길이의 각 기준항목에 대한 차수성능 평가를 위한 매개변수 해석을 위하여 이용된 해석 case를 Tables 3.6 ~ 3.7에 나타내었다.

Table 3.6 Parametric analysis cases with different hydraulic conductivity and thickness of impermeable soil layer for rubble mound type landfill

Extended length of HDPE sheet on the ground(cm)	Hydraulic conductivity of impermeable soil layer, k(cm/s)			Thickness of impermeable soil layer (cm)
500	1×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-7}	250
				300
				350
				400
				450
				500
				550
				600
				650
				700
				750
				800
				900
				1000

Table 3.7 Parametric analysis cases with different hydraulic conductivity of vertical barrier wall and extended length of HDPE liner for rubble mound type landfill

Embedded depth of vertical barrier wall in impermeable soil layer for preventing leakage(cm)	Hydraulic conductivity of impermeable soil layer, k(cm/s)			Extended length of HDPE liner on the ground(cm)
500	1×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-7}	50
				100
				150
				200
				250
				300
				350
				400
				450
				500
				550
				600

경사제식 호안의 차수시트는 시트이음부의 시공 불량, 주변 구조물과의 경계 접합불량, 사석에 의한 손상, 반복하중 및 지속적인 하중 작용으로 인한 피로파괴 등의 손상이 발생 할 수 있다(嘉門 雅史, 乾 徹, 2002). 그러므로 차수시트의 손상빈도를 Kamon et al.(2002)의 방법에 기초하여 차수시트 손상시의 배면측 재료에 따른 환산투수계수를 적용하여 검토하였으며, case별 적용값은 Table 3.8과 같다.

Table 3.8 Equivalent hydraulic conductivity with different backfill materials of damaged HDPE liner(嘉門 雅史, 2002)

Back layer of HDPE Equivalent hydraulic conductivity	Rubble Mound ($1 \times 10^0 \text{ cm/s}$)	Mid protection			Clay ($1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$)
		case 1 ($1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$)	case 2 ($1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$)	case 3 ($1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$)	
Damage frequency(高) (200hole/ha)	$1.57 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$	$1.57 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$	$1.73 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$	$3.17 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$	$3.17 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$

경사제식 호안 단면에 대해서도 정상류 하에서의 매개변수해석에 의한 차수 성능평가 결과를 반영한 조건으로 조위변동을 고려한 차수시스템의 차수성능을 평가하고, 정상류 하에서의 해석 결과와 비교하였다.

또한, 폐기물층 수두가 해역의 수두와 같거나 낮을 경우에 대해서도 침투·이류 분산해석을 수행하여 관리수위에 대하여 제안하였다.



제 4 장 정상류 하에서의 바닥 차수시스템 차수성능 평가

4.1 개요

해상 폐기물매립장은 그 입지적 특성상 조석의 영향을 받으므로 폐기물매립장 주변 지층내의 지하수 흐름은 비정상류 흐름을 나타내고, 그에 따라 오염물 농도가 시간에 따라 변화할 수 있다. 그러므로 해상 폐기물매립장의 경우 육상 폐기물매립장과 달리 폐기물내 오염물의 이동을 분석할 때 조수간만의 영향을 반영할 필요가 있다.

하지만 이러한 비정상류 상태에서의 오염물 이동 및 농도 분포를 수식적으로 예측하는 것은 어렵다(Foose, 2010). 따라서 이러한 경우 수치해석적인 방법이 이용된다. 그러나 수치해석에 상당한 계산성능과 계산비용이 요구되므로 정상상태 하에서의 오염물 이동 및 농도 분포를 예측하는 것이 일반적이다. 그리고 정상류 상태를 가정하여 차수시스템의 차수성능을 평가하는 것이 보다 보수적인 설계를 위하여 바람직한 측면도 있다(Rubin & Rabideau, 2000; Foose, 2010).

따라서 4장과 5장에서는 먼저 2중 연직벽체로 이루어진 호안과 경사제식 호안에 대하여 정상류 하에서의 해상 폐기물매립장의 매개변수를 달리하여 차수시스템의 차수성능을 평가한다. 그 다음 6장에서는 정상류 흐름과 비정상류 흐름에서의 오염물 이동 및 농도 분포의 차이를 비교하고자 한다.

4.2 2중 연직벽체 호안

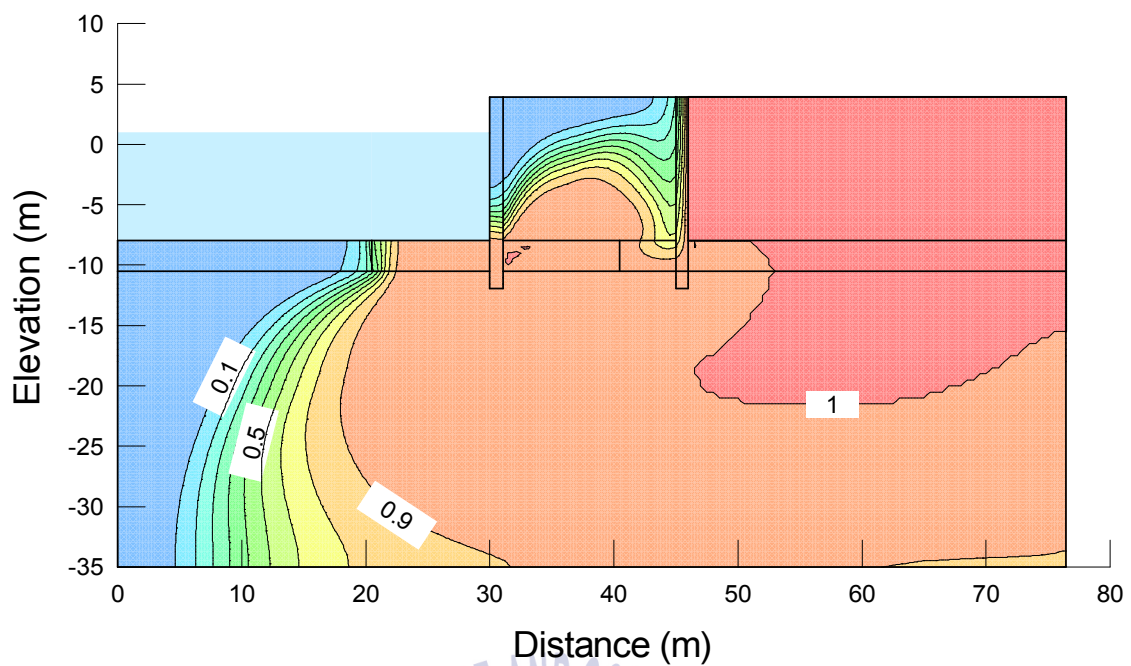
4.2.1 투수계수의 영향

해상 폐기물매립장의 2중 연직벽체 호안의 바닥 차수를 위한 바닥 차수시스템의 두께 및 투수계수에 대한 최적의 최소기준을 도출하기 위하여 측면 차수시스템에 대해 차수 처리한 근입깊이와 투수계수를 각각 250cm 및 1×10^{-11} cm/s로 고정하고 바닥 차수시스템의 3가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 두께를 250cm에서 1000cm까지 50cm 간격으로 총 14가지 경우(250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 900, 1000)에 대하여 침투·이류 분산해석을 수행하였다.

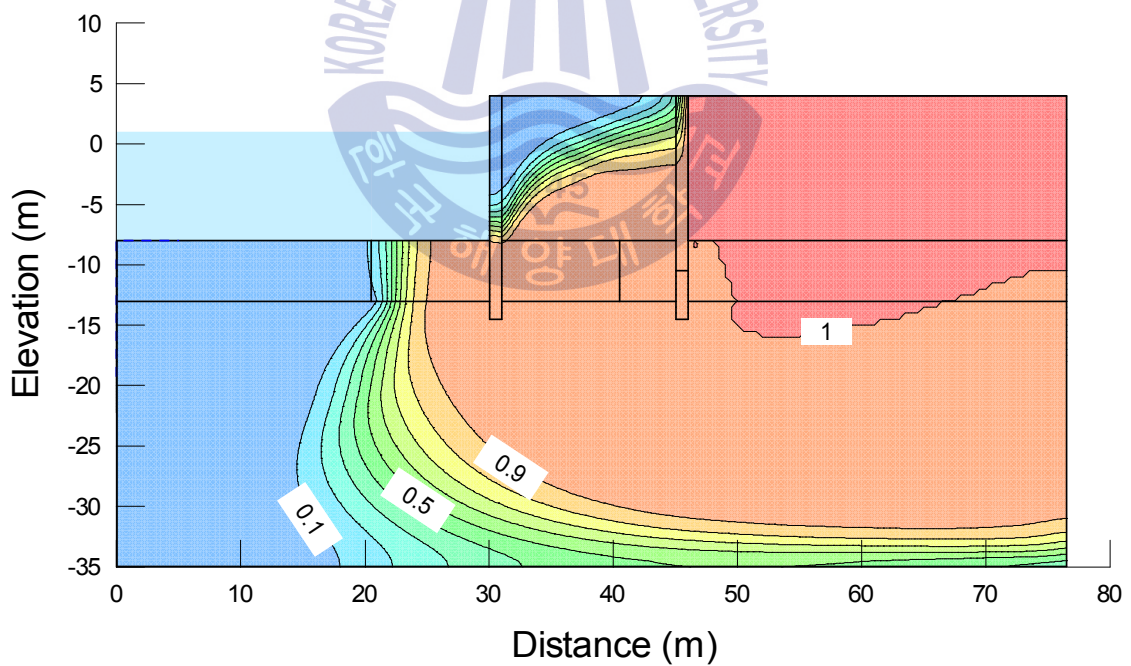
Figs. 4.1 ~ 4.3에서는 세 가지 투수계수의 해석두께 중 대표적으로 250cm, 500cm, 750cm, 1000cm의 50년 경과 후 오염물 농도 분포를 나타내었다. 투수계수 1×10^{-5} cm/s의 경우 농도의 차이는 있으나 대부분 바닥 차수시스템을 통과하여 이동되었으며, 두께가 얇을수록 이동범위가 매우 넓어짐을 알 수 있다. 1×10^{-6} cm/s의 경우 1×10^{-5} cm/s에 비해 이동범위가 매우 좁아졌으며, 두께 500cm와 1000cm는 차이가 크지 않는 것으로 나타났다. 투수계수 1×10^{-7} cm/s의 경우 이동범위가 매우 작아 오염물 이동 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Figs. 4.4 ~ 4.6은 각각 바닥 차수시스템의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대한 바닥 차수시스템의 두께 변화에 따른 50년 경과 후 누적누출량의 막대그래프를 나타낸다. 그림에서 TC는 바닥 차수시스템의 두께를, K는 투수계수를, ED는 측면 차수시스템의 차수처리 근입깊이를 각각 나타낸다.

그림에 나타난 것처럼 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 누적누출량의 범위는 각각 대략 134g ~ 1237g, 0.0002g ~ 6.7g, 1.1E-13g ~ 3.4E-11g의 분포를 나타낸다. Fig. 4.7은 세 가지 투수계수에 대한 50년 경과 누적누출량의 막대그래프를 비교한 것인데, 누출량 차이가 매우 커서 1×10^{-6} cm/s 및 1×10^{-7} cm/s의 누출량 구분이 어렵게 보여진다. 1×10^{-5} cm/s인 경우를 기준으로 1×10^{-6} cm/s 및 1×10^{-7} cm/s일 때 각각 약 99.935% 및 99.999% 감소하는 것으로 나타났다.

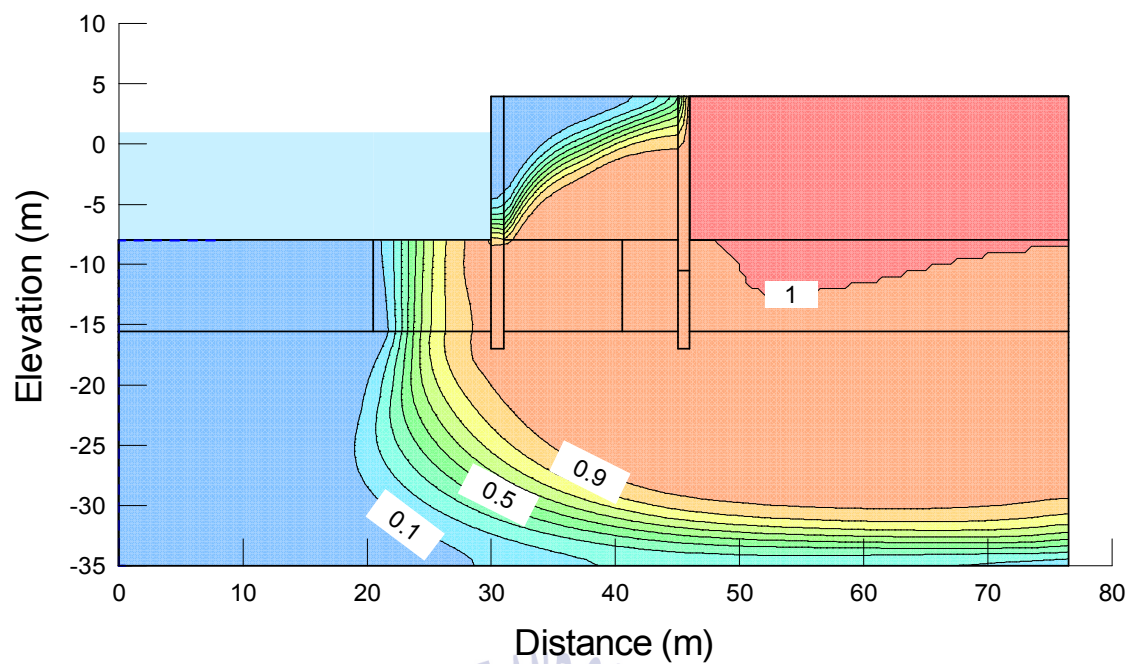


(a) $t=250\text{cm}$

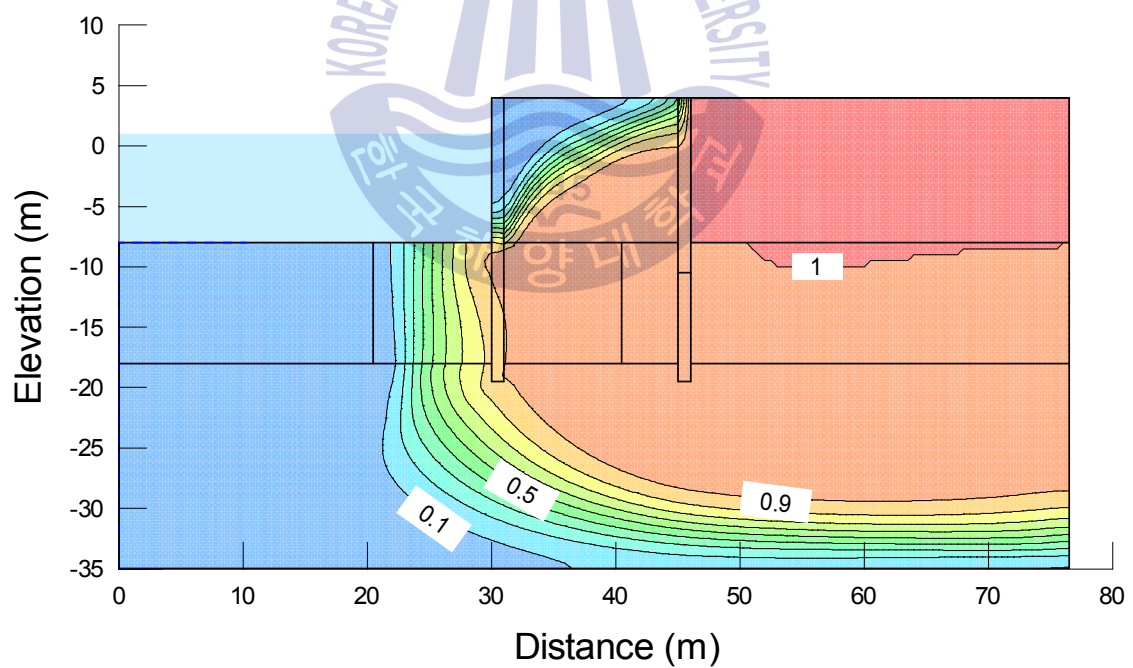


(b) $t=500\text{cm}$

Figure 4.1 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$

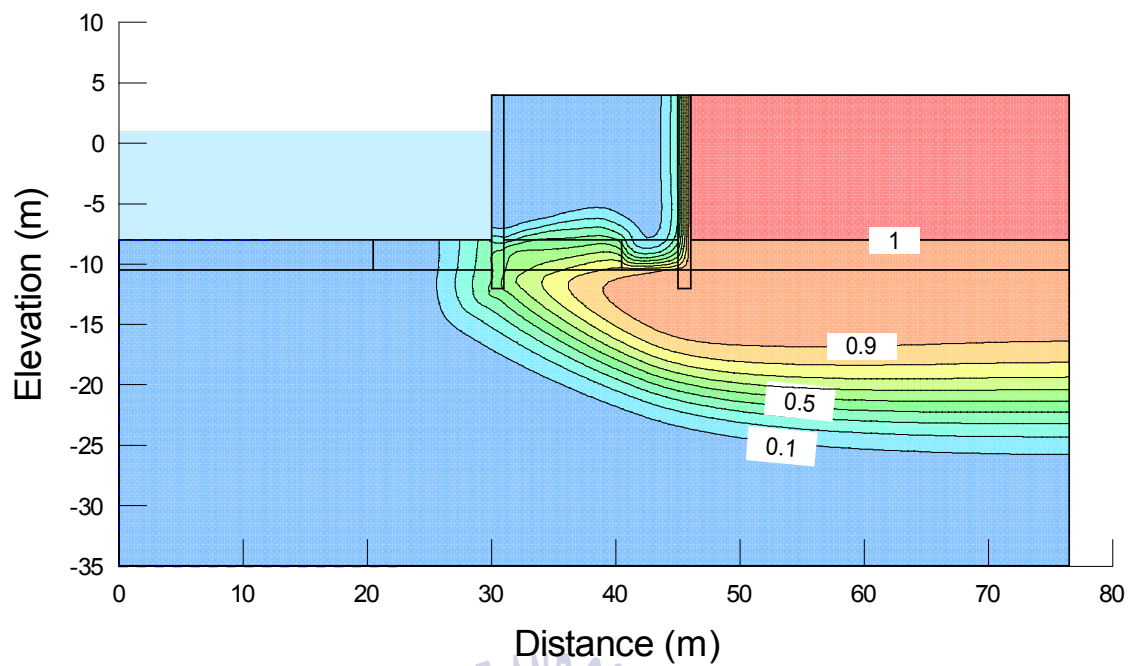


(c) $t=750\text{cm}$

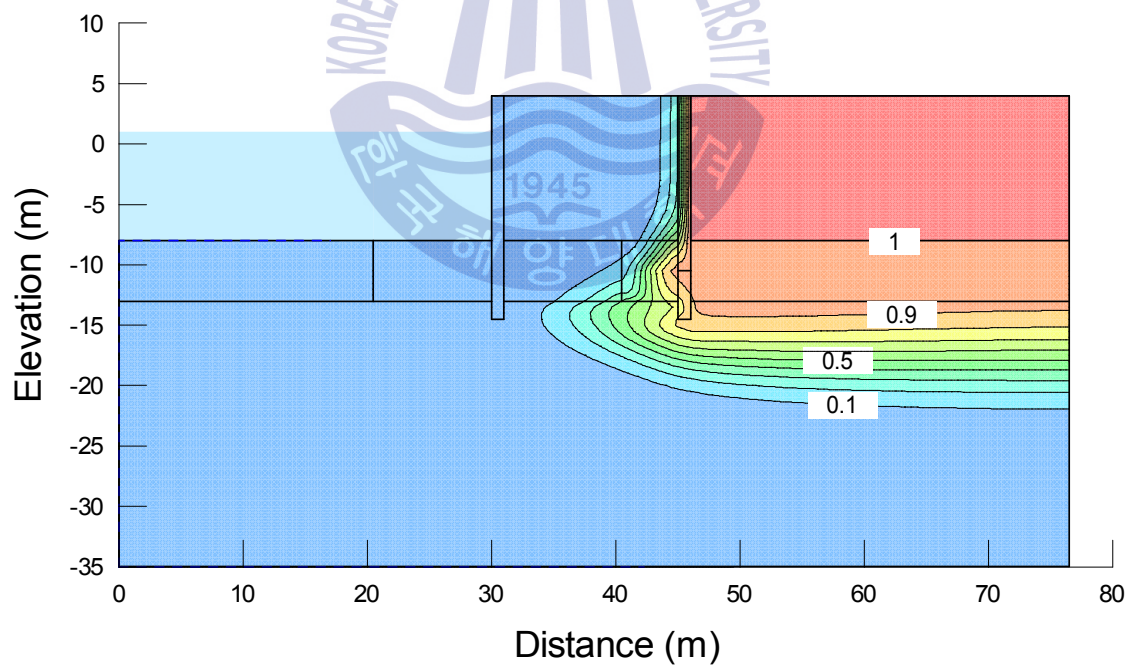


(d) $t=1000\text{cm}$

Figure 4.1 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ (continued)

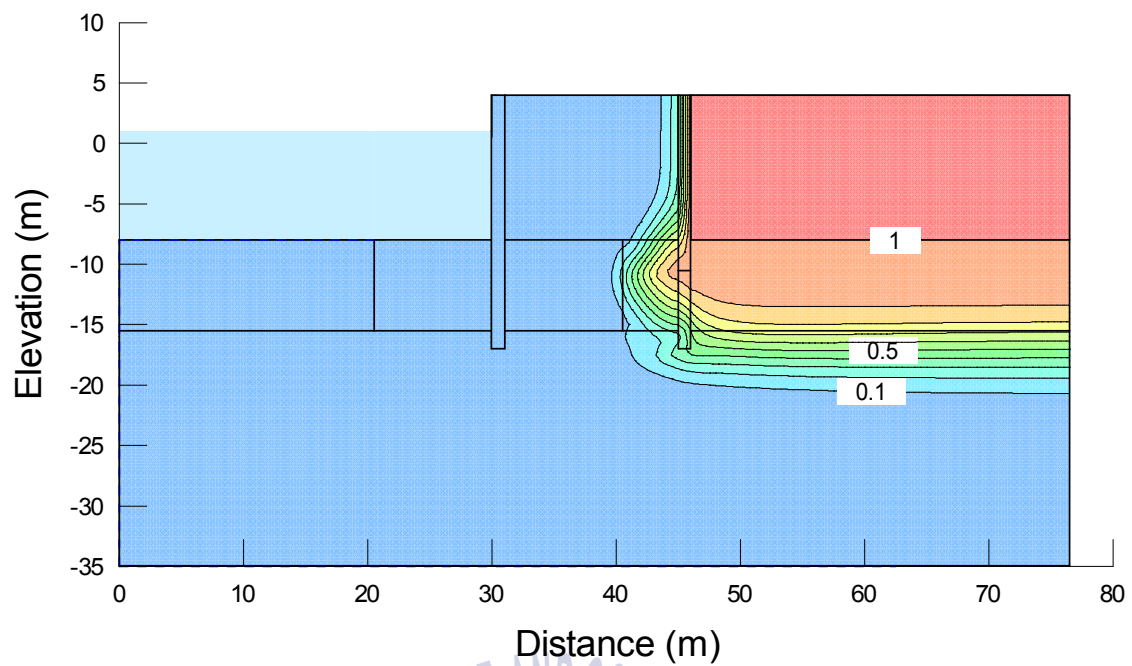


(a) $t=250\text{cm}$

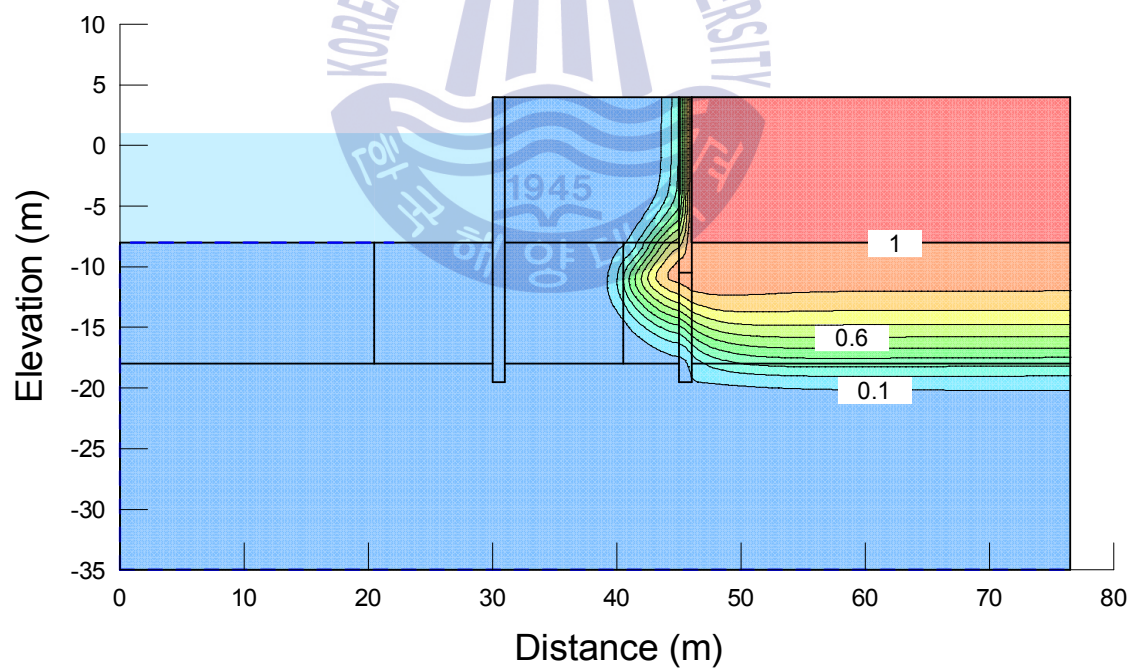


(b) $t=500\text{cm}$

Figure 4.2 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$

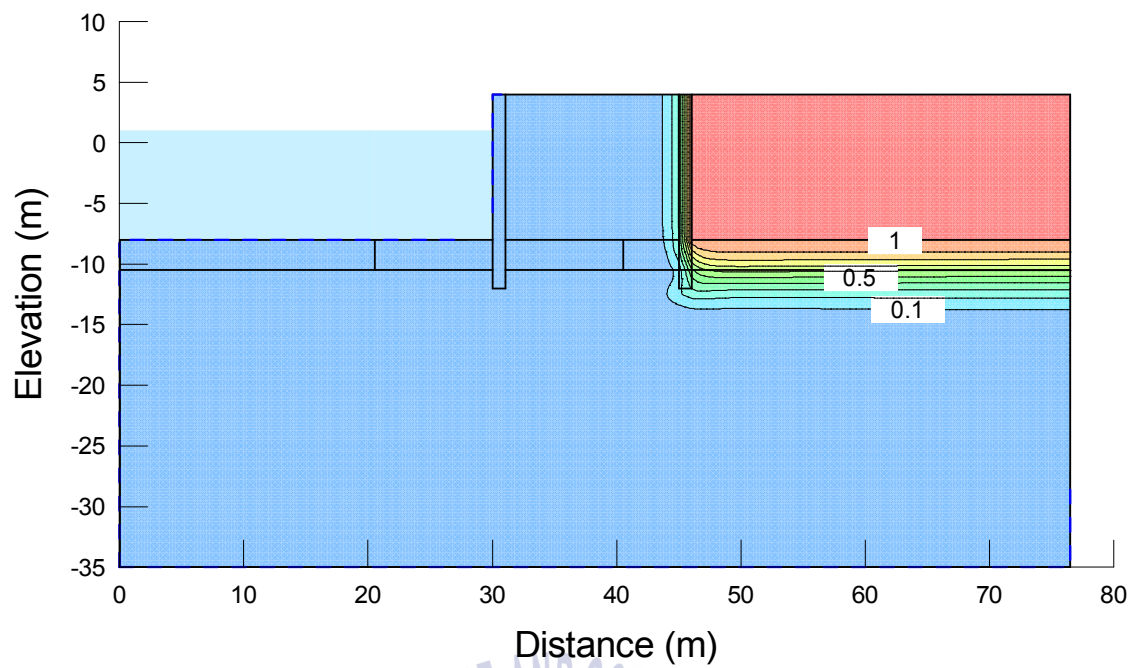


(c) $t=750\text{cm}$

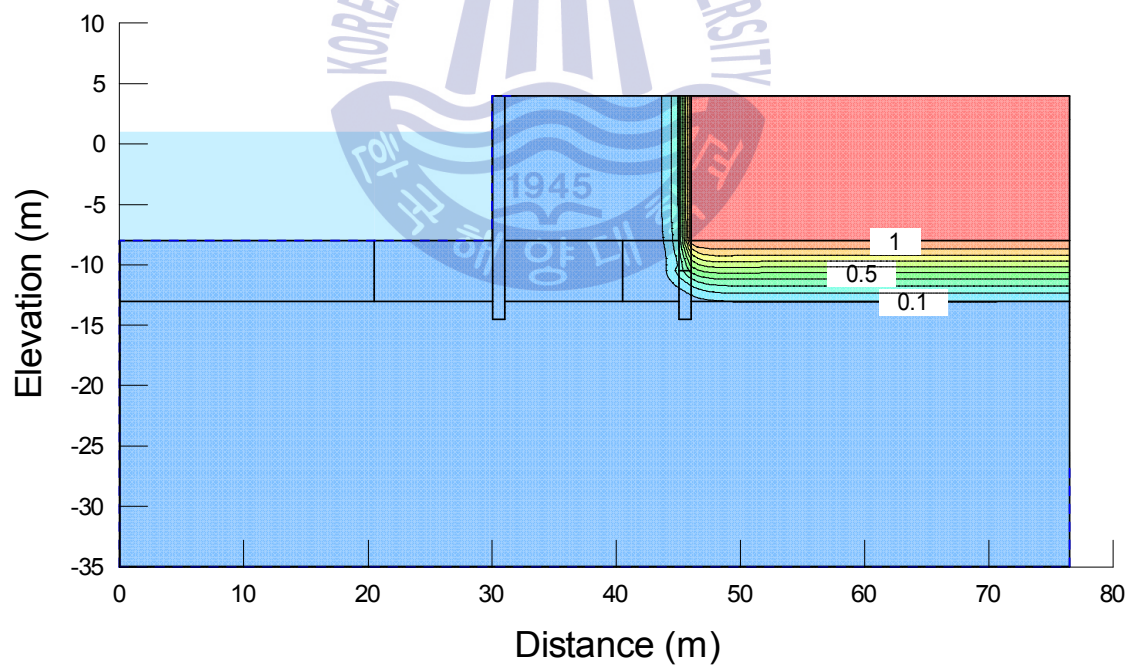


(d) $t=1000\text{cm}$

Figure 4.2 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ (continued)

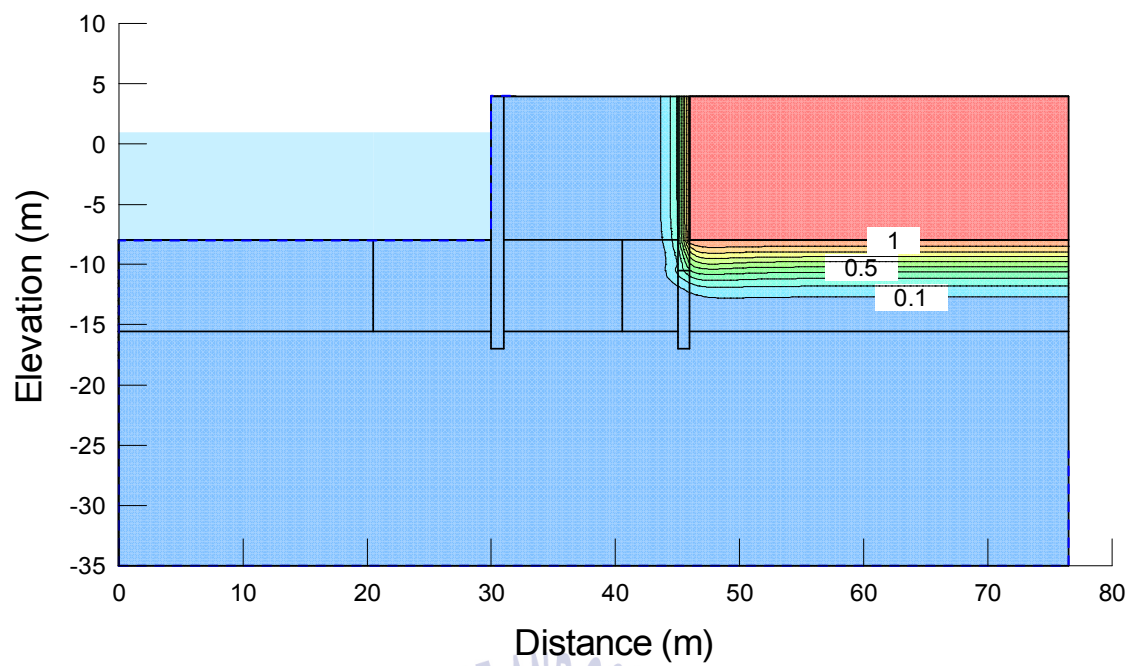


(a) $t=250\text{cm}$

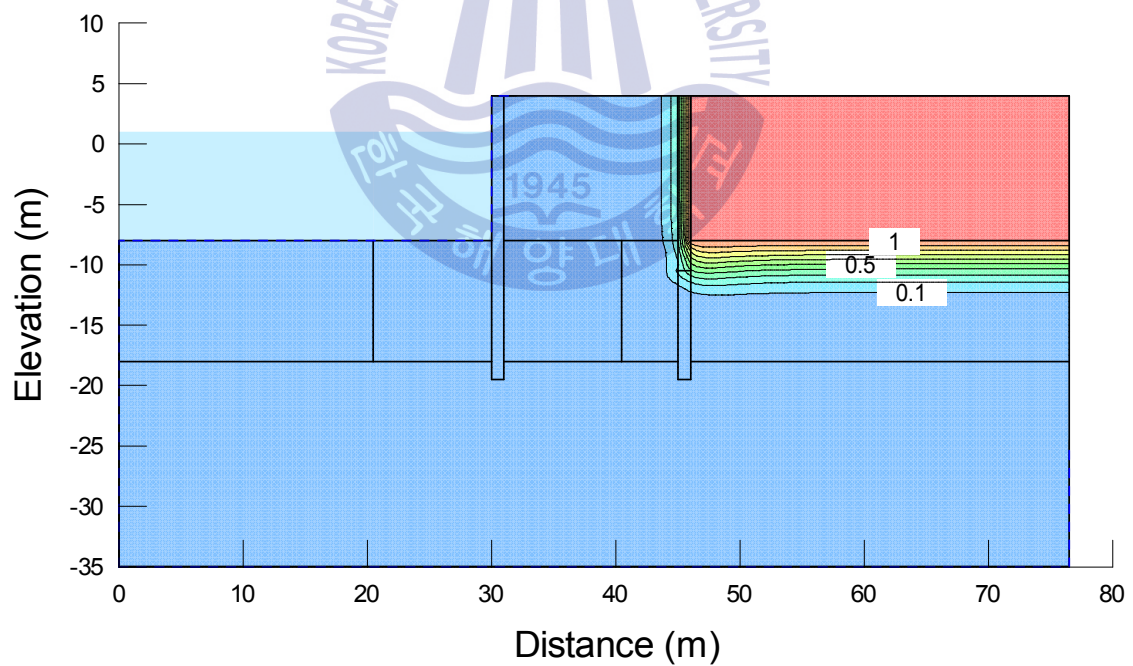


(b) $t=500\text{cm}$

Figure 4.3 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$



(c) $t=750\text{cm}$



(d) $t=1000\text{cm}$

Figure 4.3 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ (continued)

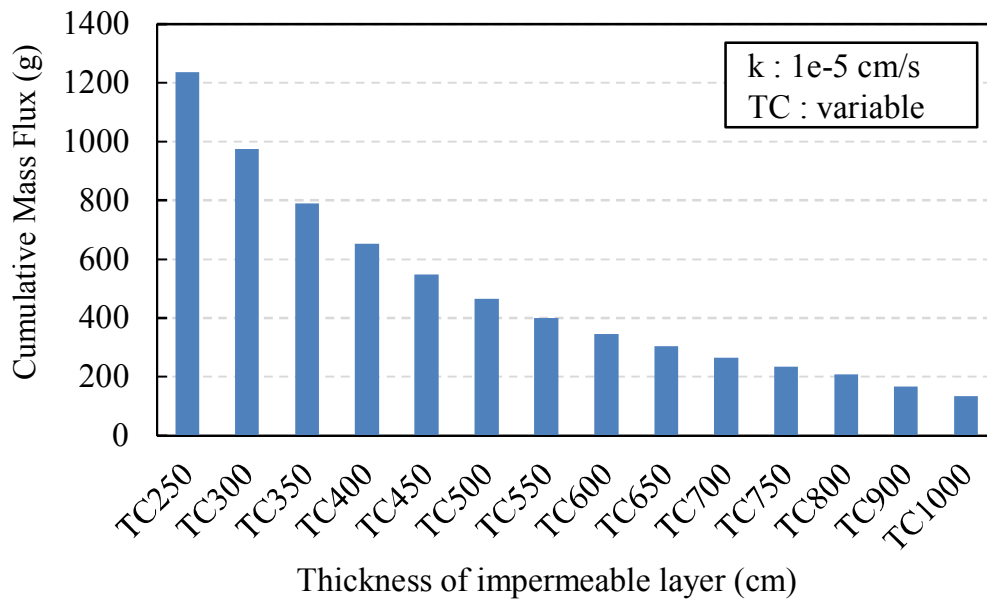


Figure 4.4 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

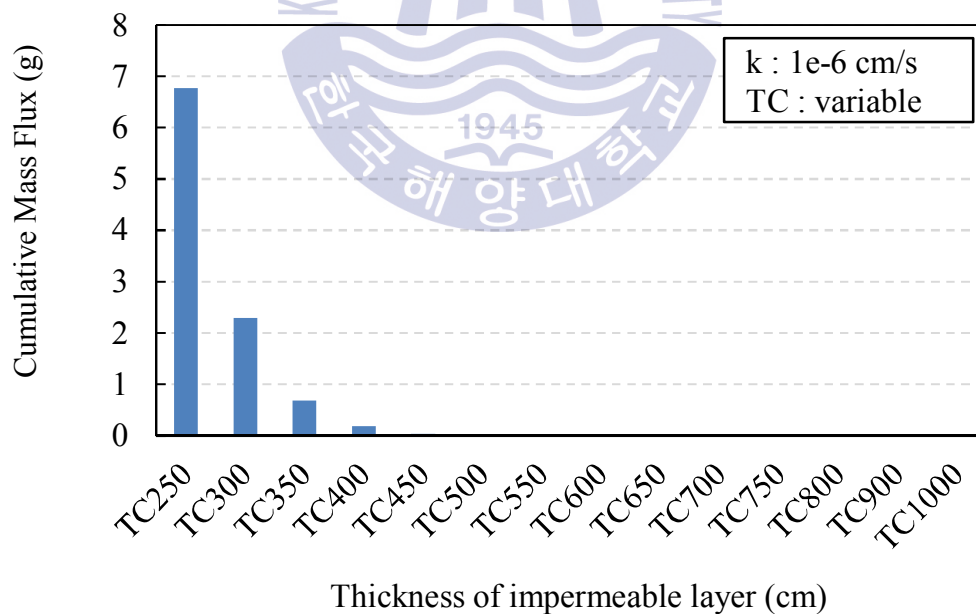


Figure 4.5 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$

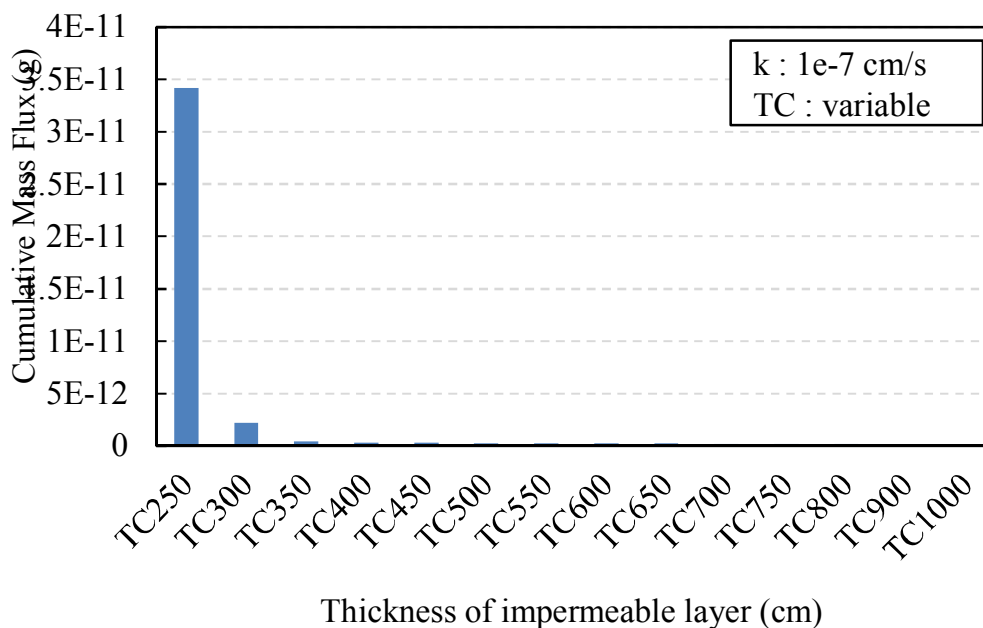


Figure 4.6 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$

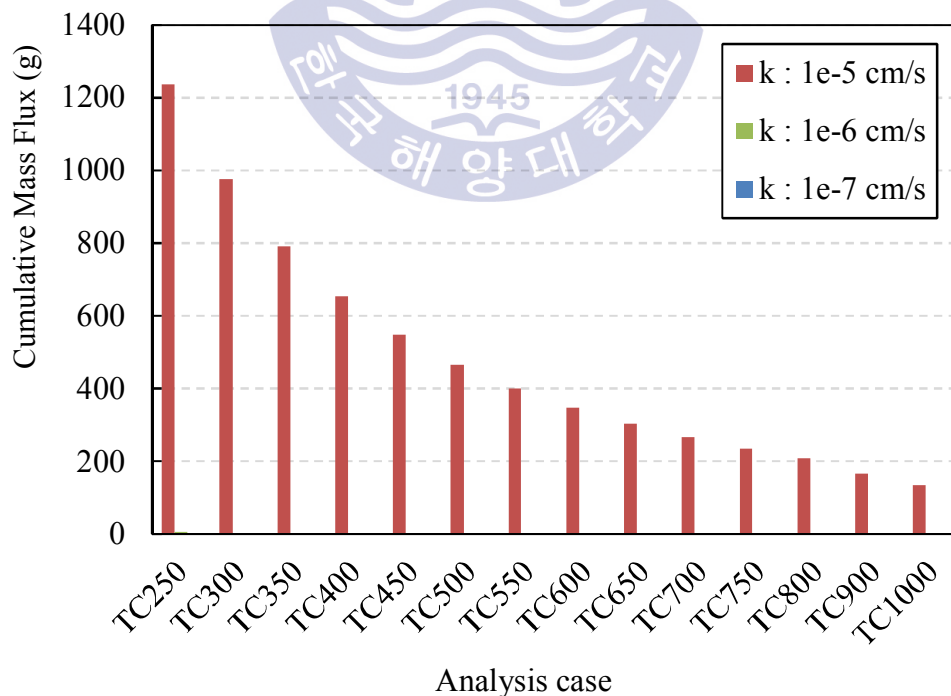


Figure 4.7 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness and hydraulic conductivity of soil layer

4.2.2 두께의 영향

Figs. 4.8 ~ 4.10은 2중 연직벽체 호안에서의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 에 대한 바닥 차수시스템의 두께에 따른 50년 경과후 누적누출량을 나타낸다. 그림에서와 같이 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 에 대한 바닥 차수시스템의 최적의 두께는 각각 492, 352, 303cm로 나타났으며, 앞서 산정한 최적의 투수계수 최소기준 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 에 대한 최적의 두께는 352cm이다.

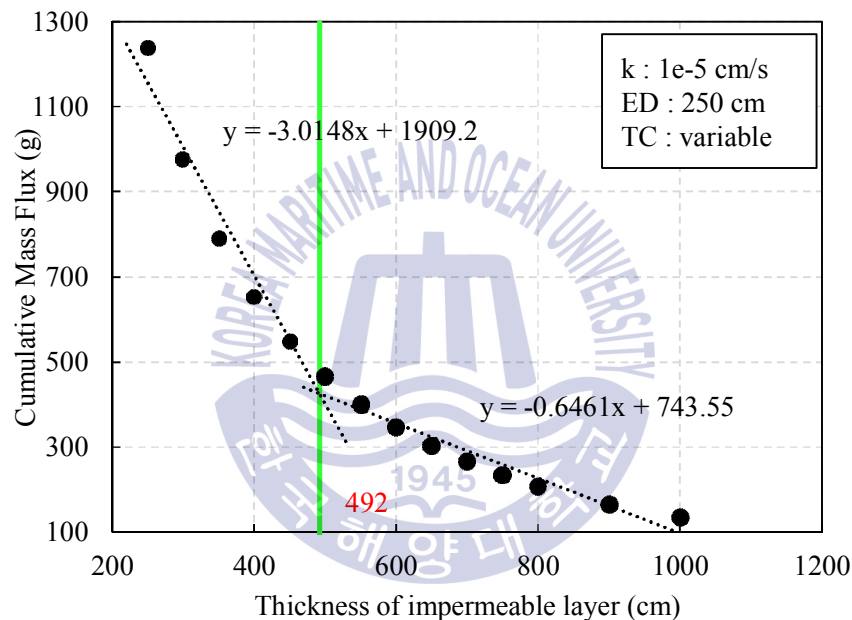


Figure 4.8 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$

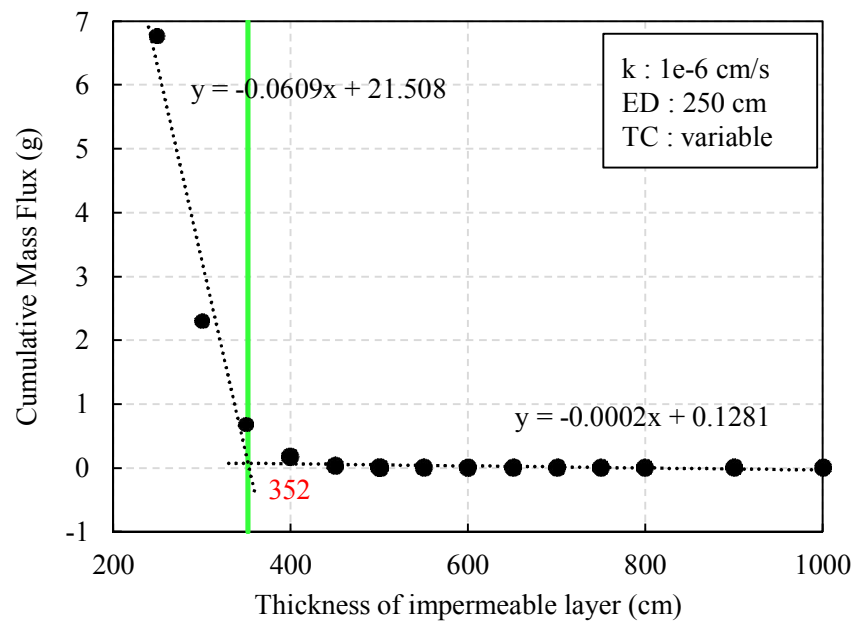


Figure 4.9 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$

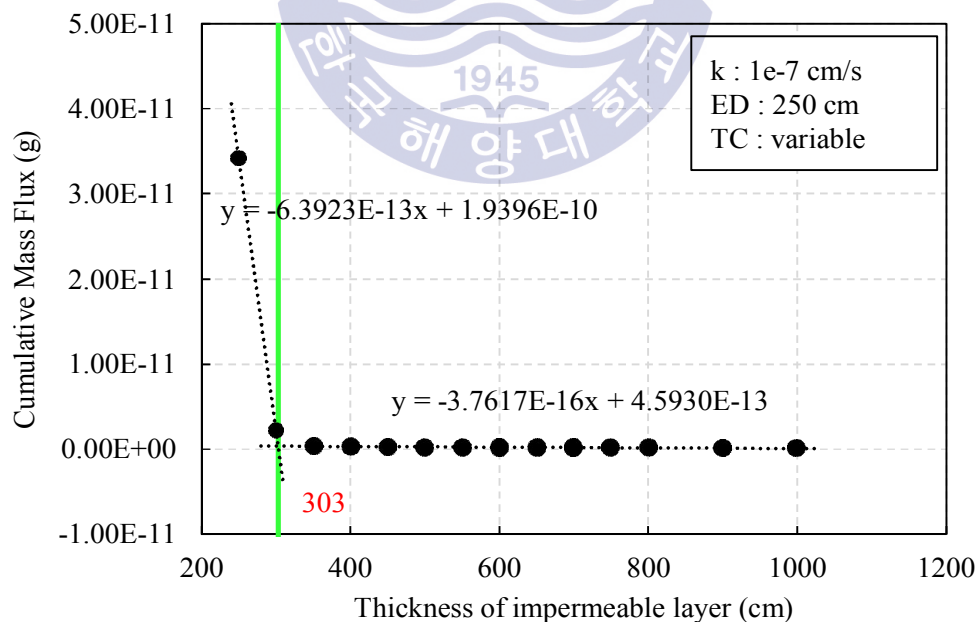


Figure 4.10 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$

4.2.3 소결

해상 폐기물매립장의 바닥 차수를 위한 불투수성 해저 점성토 지반의 투수계수에 대한 최적의 최소기준을 도출하기 위하여 2중 연직벽체 호안의 측면차수벽체의 근입깊이와 투수계수를 각각 500cm 및 1×10^{-11} cm/s로 고정하고, 바닥 차수재인 점토층은 세 가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 두께를 250cm에서 1000cm까지 50cm 간격으로 총 14가지 경우 대한 50년 경과 후 누적누출량을 비교하였다.

각각의 경우의 막대그래프를 비교한 결과 1×10^{-5} cm/s인 경우를 기준으로 1×10^{-6} cm/s 및 1×10^{-7} cm/s일 때 각각 약 99.935% 및 99.999% 감소하였으며, 투수계수가 1×10^{-6} cm/s에서 1×10^{-7} cm/s으로 감소한 경우 추가적으로 약 0.06%의 누출량이 감소하여 그 효과가 거의 동일한 것을 알 수 있다. 따라서, 불투수성 해저점토지반의 최적의 투수계수에 대한 최소기준은 1×10^{-6} cm/s가 합리적인 것으로 판단된다.

바닥 차수 두께를 산정하기 위해 불투수성 해저 점성토 지반의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s의 경우 대한 두께분석 결과 바닥 차수시스템의 최적의 두께는 각각 492, 352, 303cm로 나타났으며, 앞서 산정한 최적의 투수계수 최소기준 1×10^{-6} cm/s에 대한 최적의 두께는 352cm로 산정되었다. 그러나, 해저 점토지반의 불균질성을 고려하여 30%의 여유를 두어 최소기준을 500cm로 산정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 또한, 이 경우 투수계수 1×10^{-5} cm/s에 대한 두께 492cm를 만족하므로 지반의 불균질성을 충분히 고려 가능할 것으로 판단된다.

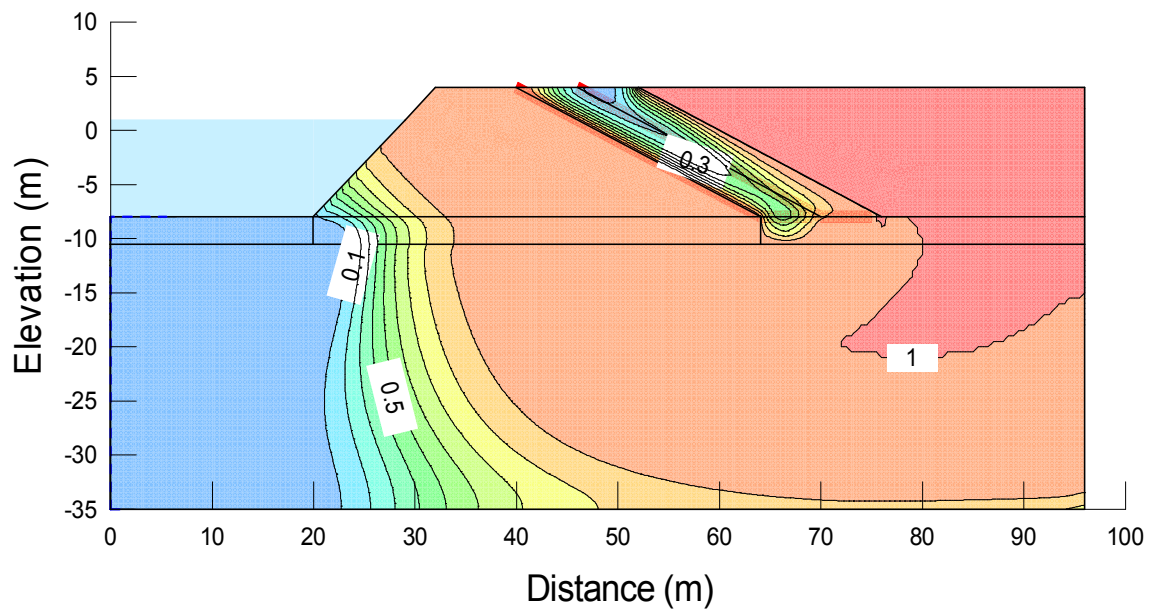
4.3 경사제식 호안

4.3.1 투수계수의 영향

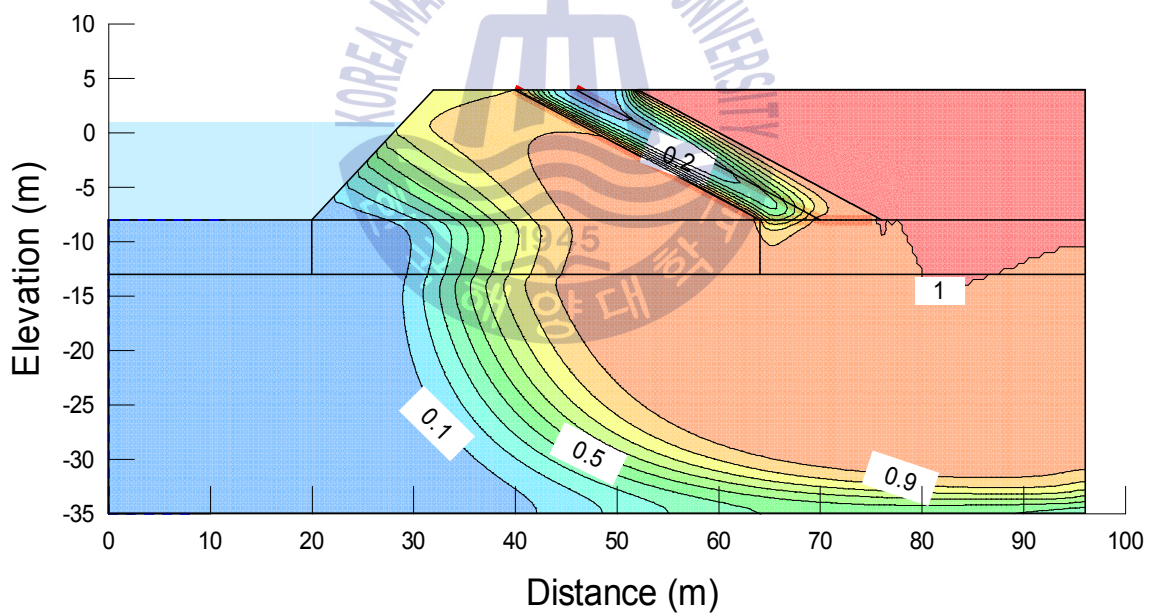
경사제식 호안에서의 바닥 차수를 위한 바닥 차수시스템의 두께 및 투수계수에 대한 최적의 최소기준을 도출하기 위하여 점성토 지반 상부에 연장설치되는 차수시트의 설치범위와 투수계수를 각각 500cm 및 1×10^{-11} cm/s로 고정하고 바닥 차수시스템의 3가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 두께를 250cm에서 1000cm까지 50cm 간격으로 총 14가지 경우(250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 900, 1000)에 대하여 침투·이류 분산해석을 수행하였다.

Figs. 4.11 ~ 4.13에서는 세 가지 투수계수의 해석두께 중 대표적으로 250cm, 500cm, 750cm, 1000cm의 50년 경과 후 오염물 농도 분포를 나타내었다. 투수계수 1×10^{-5} cm/s의 경우 2중으로 된 차수시트보다는 대부분 바닥 차수시스템을 통과하여 이동되었으며, 두께가 얇을수록 이동범위가 매우 넓어짐을 알 수 있다. 1×10^{-6} cm/s의 경우 1×10^{-5} cm/s에 비해 이동범위가 매우 좁아졌으며, 두께 500cm와 1000cm는 차이가 크지 않는 것으로 나타났다. 투수계수 1×10^{-7} cm/s의 경우 이동범위가 매우 작아 오염물 이동 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Figs. 4.14 ~ 4.16은 각각 바닥 차수시스템의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대한 바닥 차수시스템의 두께 변화에 따른 50년 경과 후 누적누출량의 막대그래프를 나타낸다. 그림에서 TC는 바닥 차수시스템의 두께를, K는 투수계수를, ED는 측면 차수시스템의 차수처리 근입깊이를 각각 나타낸다. 그림에 나타난 것처럼 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 누적누출량의 범위는 각각 대략 7g ~ 661g, $4.8\text{E}-15\text{g}$ ~ $9.7\text{E}-07\text{g}$, $1.67\text{E}-245\text{g}$ ~ $3.37\text{E}-20\text{g}$ 의 분포를 나타낸다. Fig. 4.17은 세 가지 투수계수에 대한 50년 경과 누적누출량의 막대그래프를 비교한 것으로 1×10^{-5} cm/s인 경우를 기준으로 1×10^{-6} cm/s 및 1×10^{-7} cm/s일 때 누출량이 매우작아 거의 100% 감소하는 것으로 나타나므로 그래프 상에서 거의 표현이 되지 않고 있다.

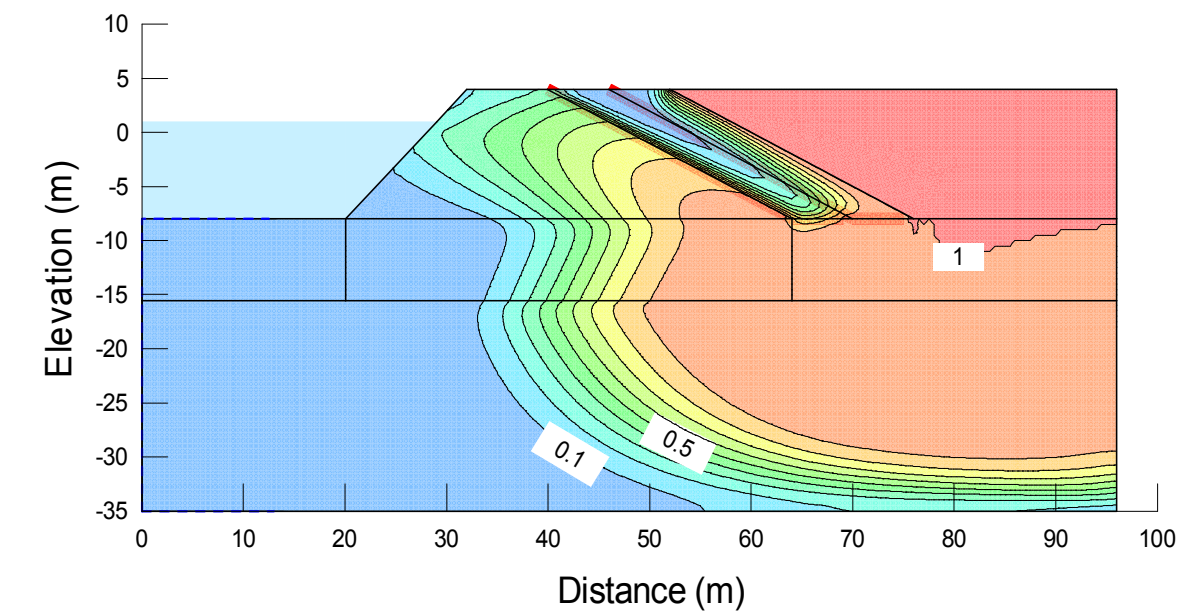


(a) $t=250\text{cm}$

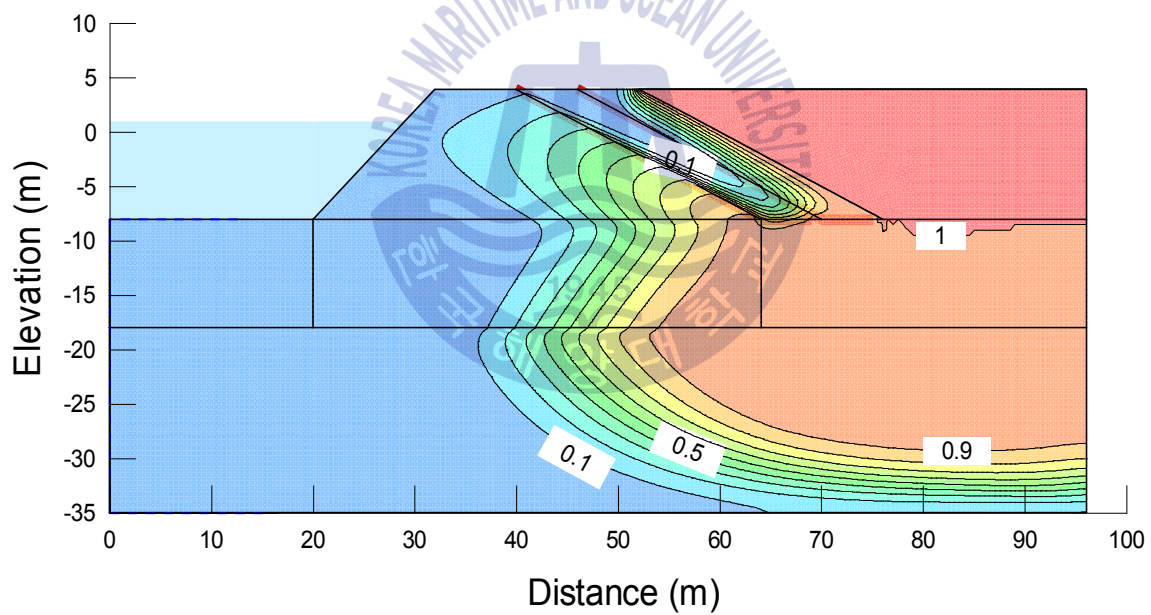


(b) $t=500\text{cm}$

Figure 4.11 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ in rubble mound type quay wall

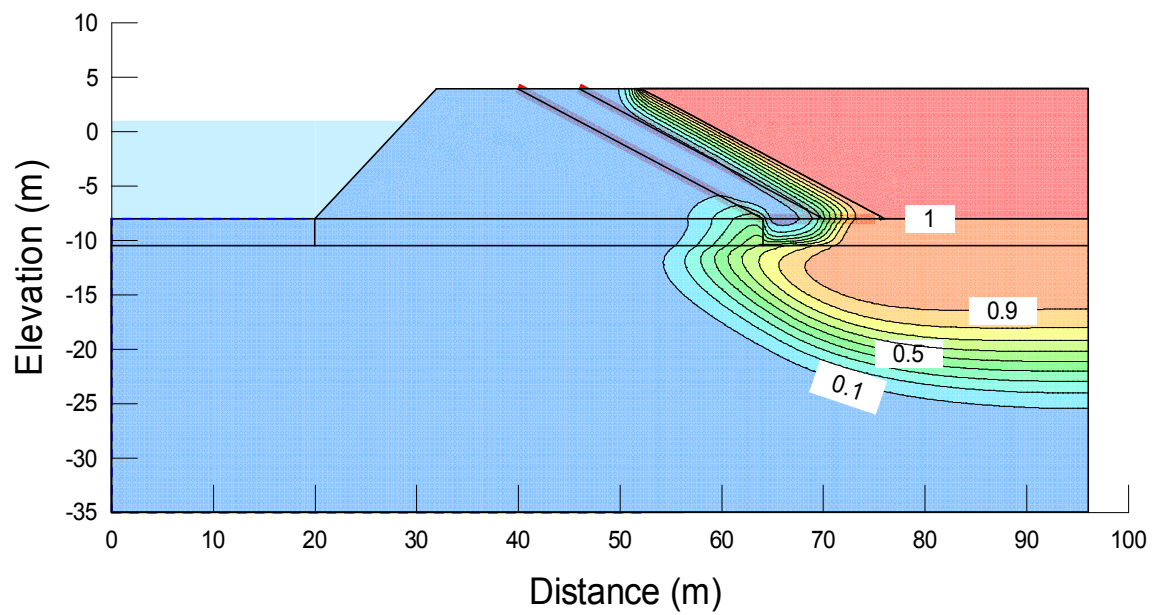


(c) $t=750\text{cm}$

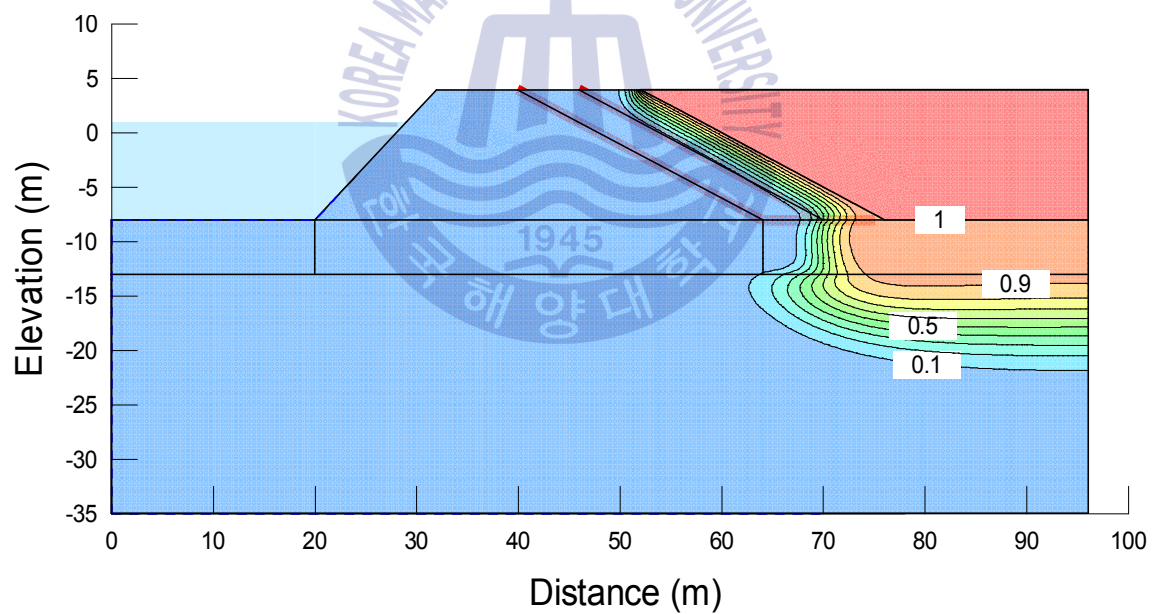


(d) $t=1000\text{cm}$

Figure 4.11 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ in rubble mound type quay wall (continued)

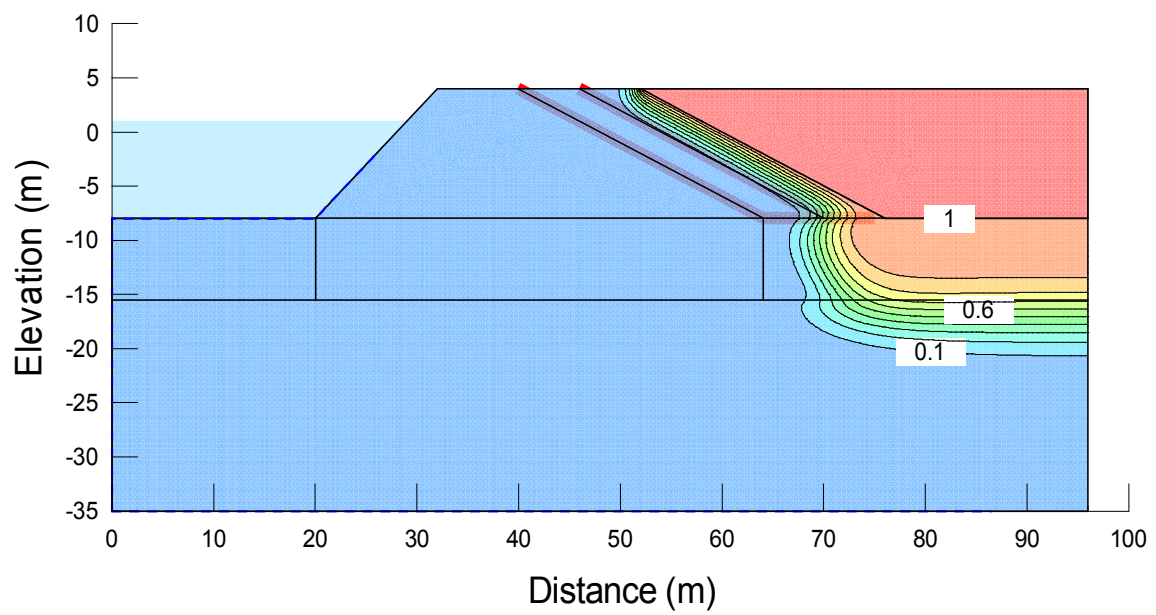


(a) $t=250\text{cm}$

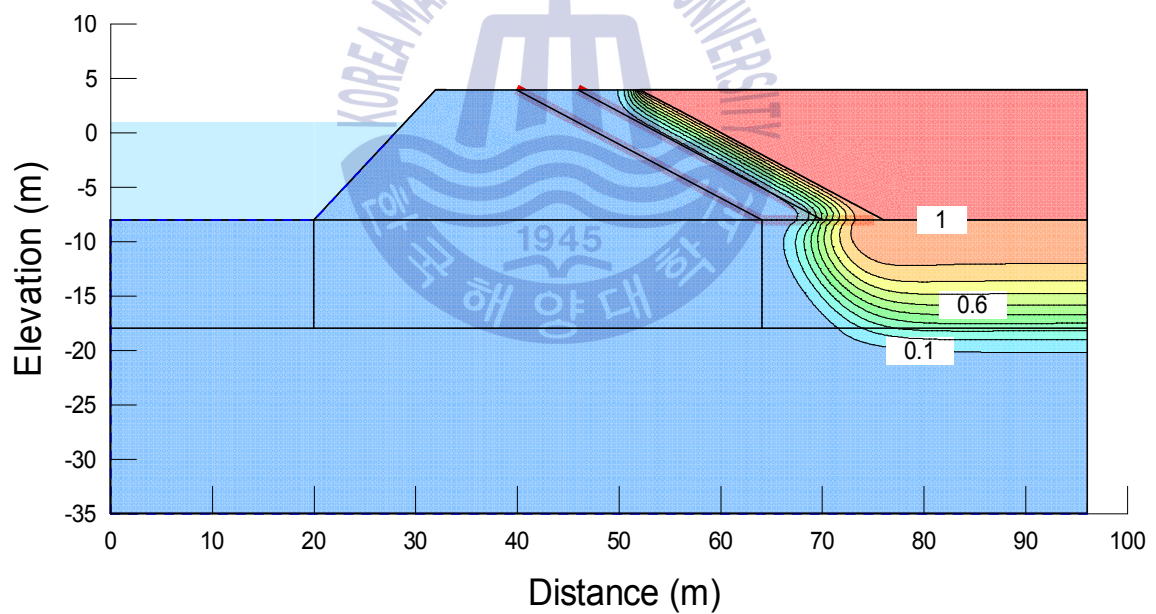


(b) $t=500\text{cm}$

Figure 4.12 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ in rubble mound type quay wall

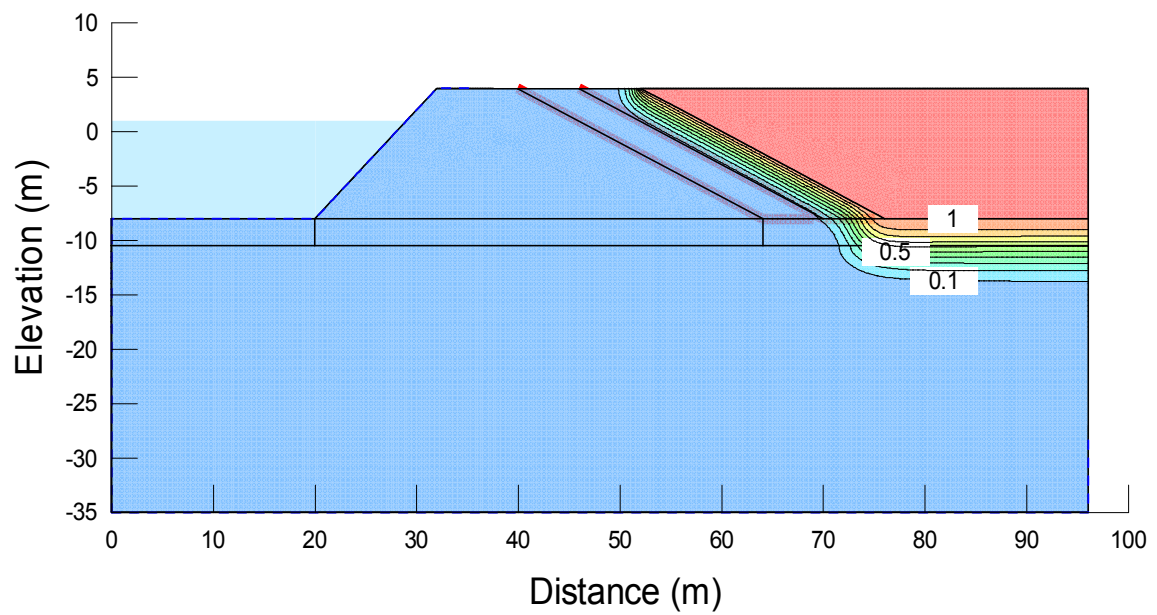


(c) $t=750\text{cm}$

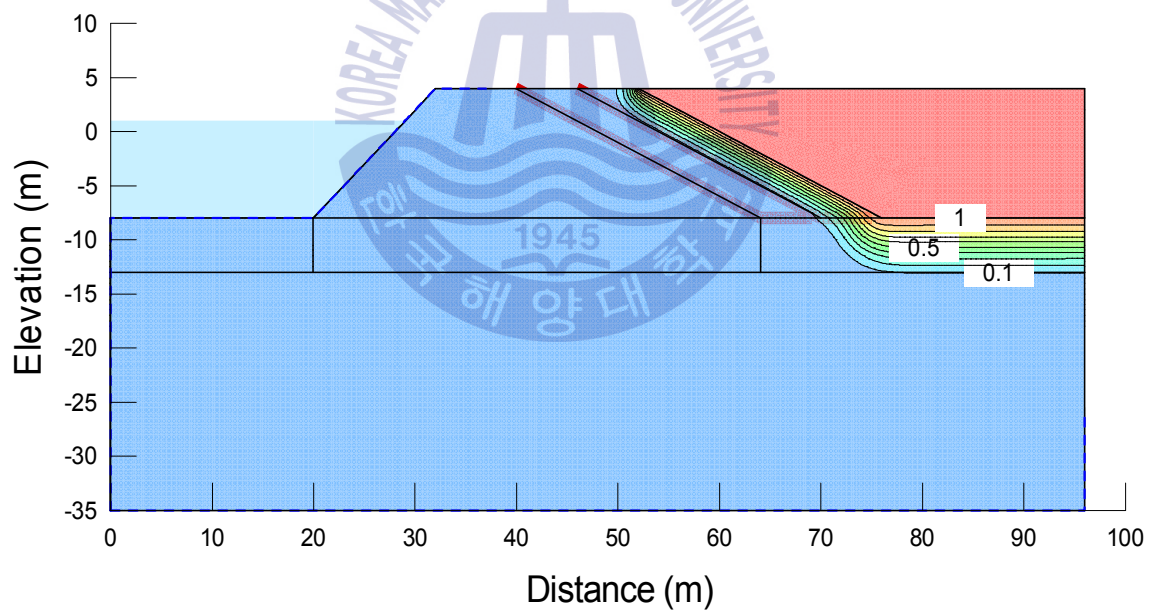


(d) $t=1000\text{cm}$

Figure 4.12 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ in rubble mound type quay wall (continued)

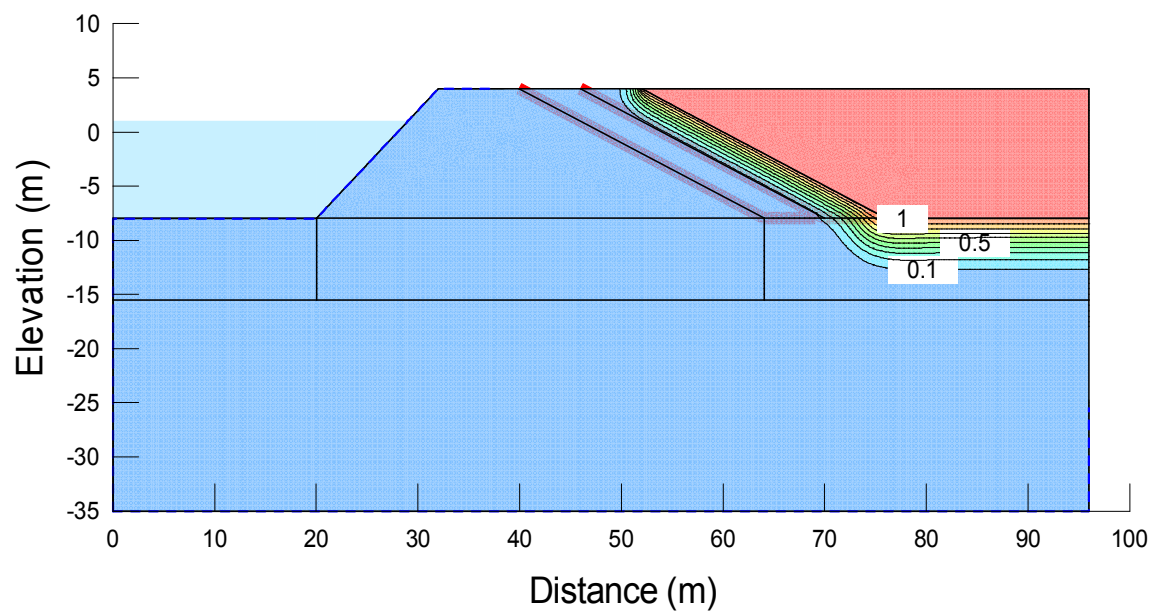


(a) $t=250\text{cm}$

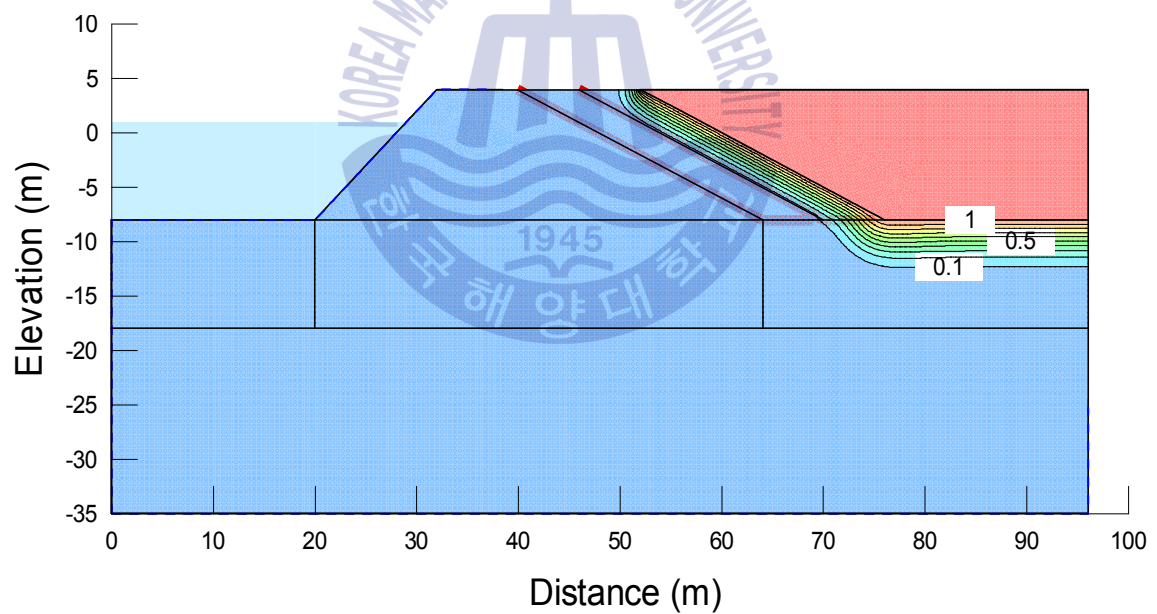


(b) $t=500\text{cm}$

Figure 4.13 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ in rubble mound type quay wall



(c) $t=750\text{cm}$



(d) $t=1000\text{cm}$

Figure 4.13 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of seabed soil stratum with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ in rubble mound type quay wall (continued)

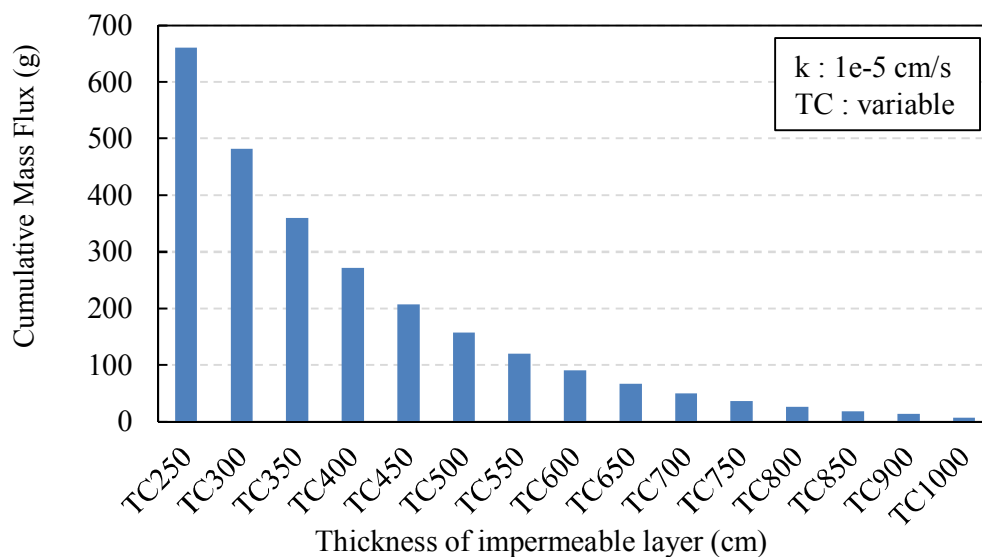


Figure 4.14 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

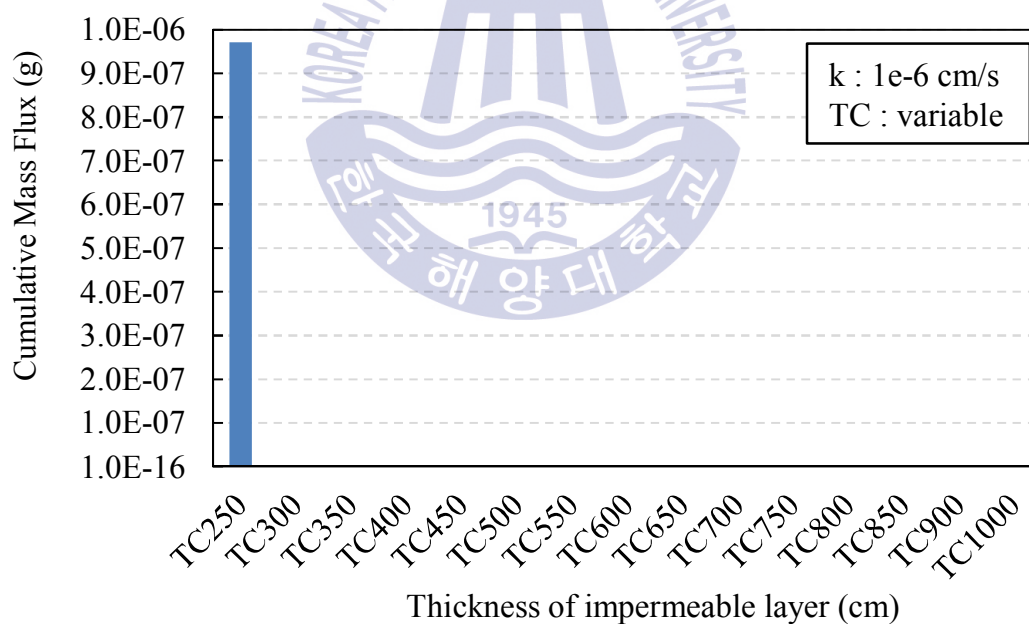


Figure 4.15 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$

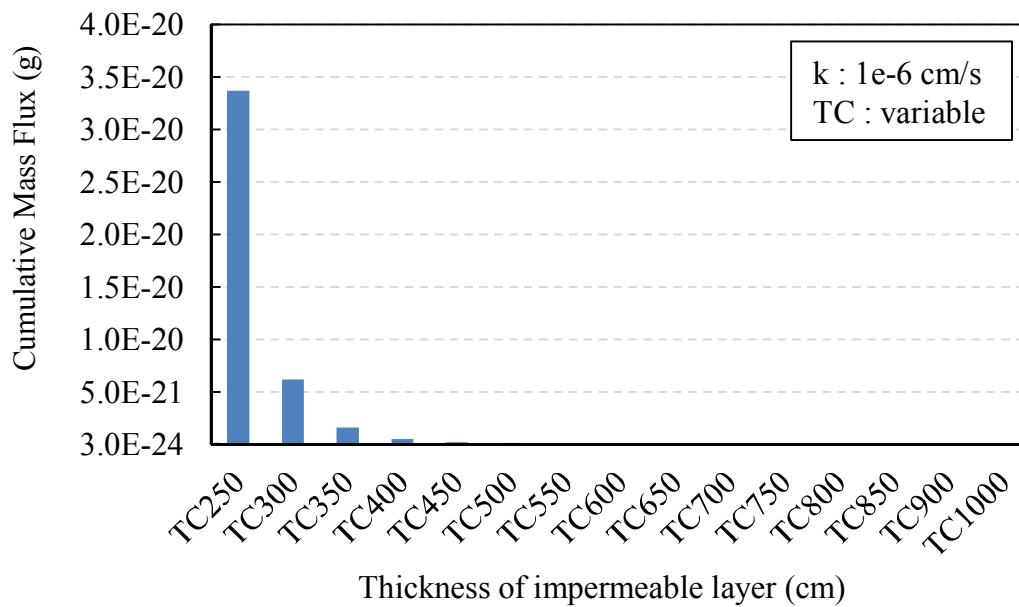


Figure 4.16 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s

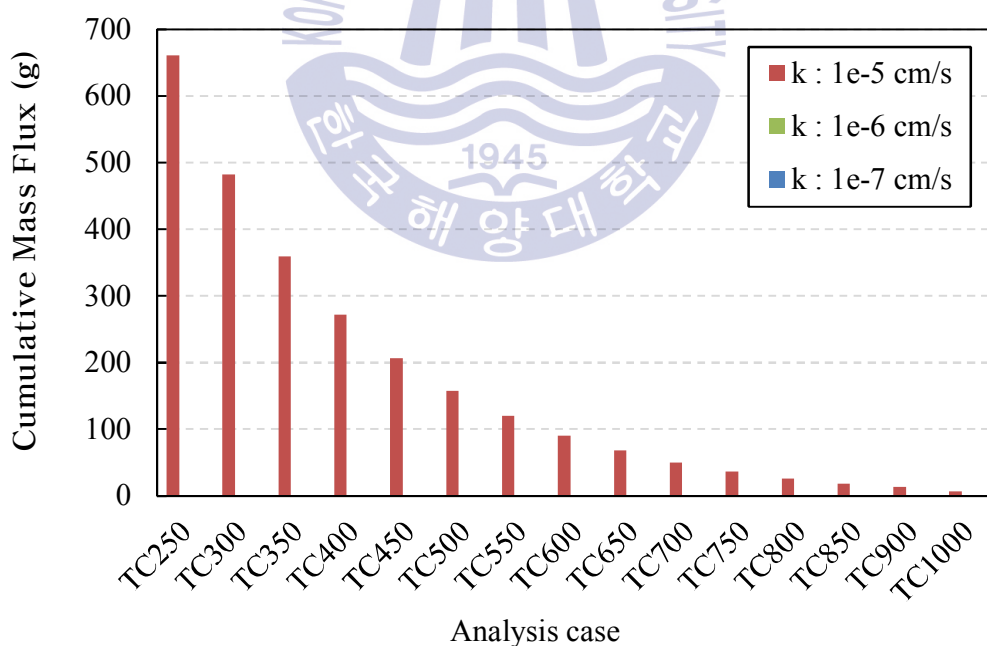


Figure 4.17 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness and hydraulic conductivity of soil layer

4.3.2 두께의 영향

Figs. 4.18 ~ 4.20은 경사제식 호안에서의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 에 대한 바닥 차수시스템의 두께에 따른 50년 경과 후 누적누출량을 나타낸다. 그림에서와 같이 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 에 대한 바닥 차수시스템의 최적의 두께는 각각 461, 384, 310cm로 나타났으며, 2중 연직벽체시 산정한 최적의 투수계수 최소기준 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 에 대한 최적의 두께는 384cm이다.

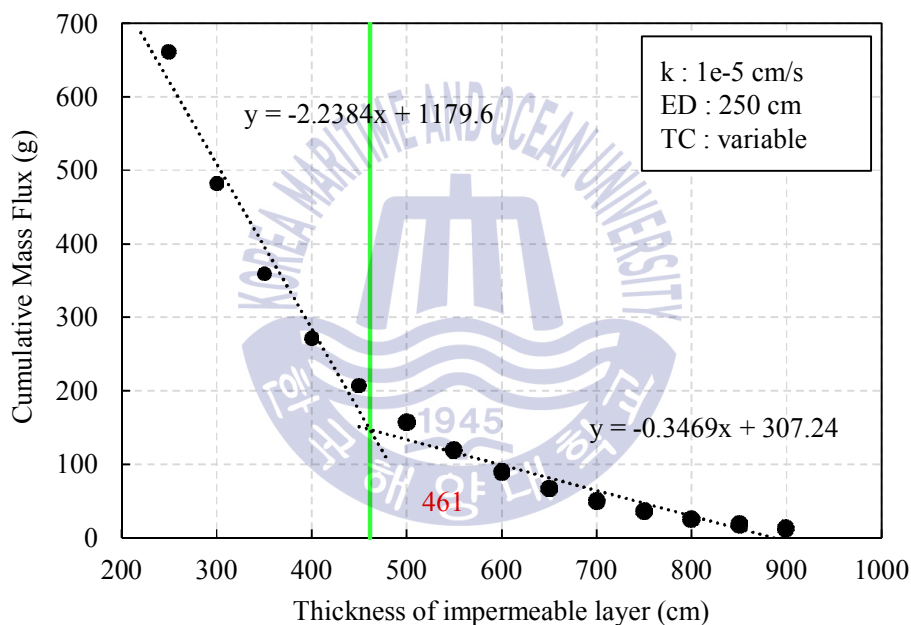


Figure 4.18 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$

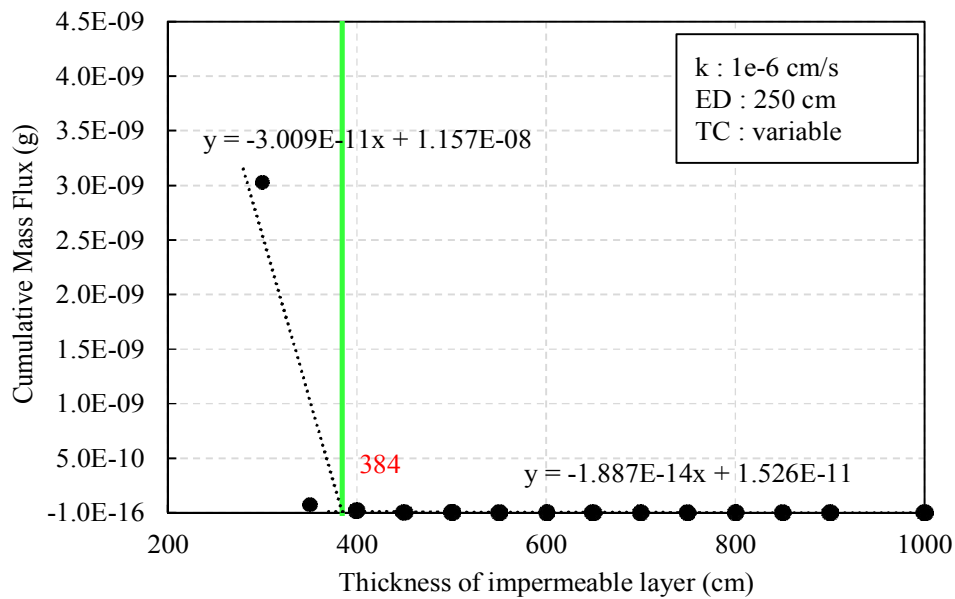


Figure 4.19 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s

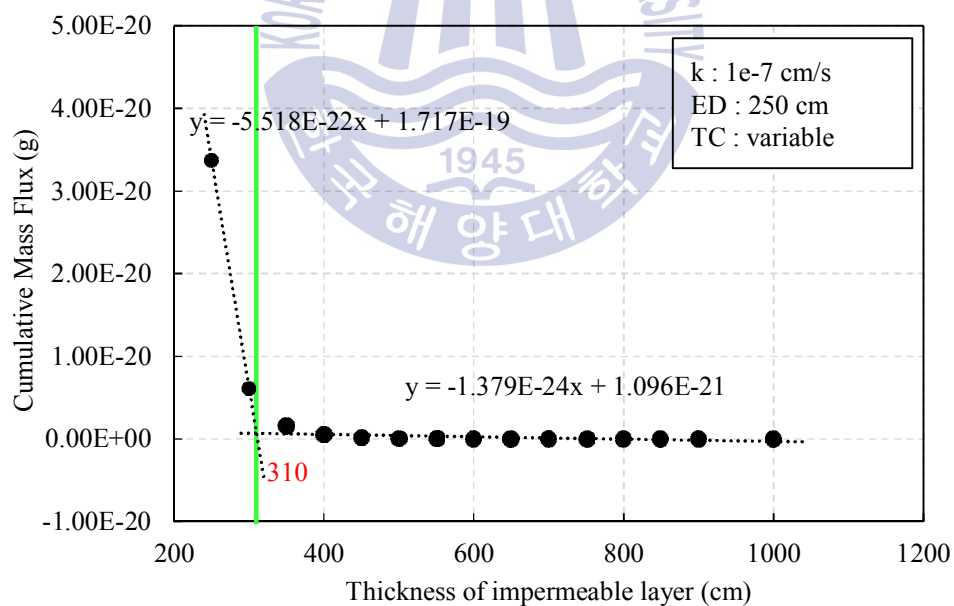


Figure 4.20 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of soil layer with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s

4.3.3 소결

해상 폐기물매립장의 바닥 차수를 위한 불투수성 해저 점성토 지반의 투수계수에 대한 최적의 최소기준을 도출하기 위하여 경사제식 호안의 점성토 지반 상부로 연장되는 차수시트길이와 투수계수를 각각 500cm 및 1×10^{-11} cm/s로 고정하고, 바닥차수재인 점토층은 세 가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 두께를 250cm에서 1000cm까지 50cm 간격으로 총 14가지 경우 대한 50년 경과 후 누적누출량을 비교하였다.

각각의 경우의 막대그래프를 비교한 결과 1×10^{-5} cm/s인 경우를 기준으로 1×10^{-6} cm/s 및 1×10^{-7} cm/s일 때 누출량이 매우 작아 거의 100% 감소하였으며, 투수계수가 1×10^{-6} cm/s에서 1×10^{-7} cm/s으로 감소한 경우 그 효과가 없는 것을 알 수 있다. 따라서, 불투수성 해저점토지반의 최적의 투수계수에 대한 최소기준은 2중 연직벽체 호안과 동일하게 1×10^{-6} cm/s가 합리적인 것으로 판단된다.

바닥 차수 두께를 산정하기 위해 불투수성 해저 점성토 지반의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s의 경우 대한 두께분석 결과 바닥 차수시스템의 최적의 두께는 각각 461, 384, 310cm로 나타났으며, 앞서 산정한 최적의 투수계수 최소기준 1×10^{-6} cm/s에 대한 최적의 두께는 384cm로 산정되었다. 경사제식 호안에서도 해저점토지반의 불균질성을 고려하여 30%의 여유를 두어 최소기준을 500cm로 산정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 또한, 이 경우 투수계수 1×10^{-5} cm/s에 대한 두께 461cm를 만족하므로 지반의 불균질성을 충분히 고려 가능할 것으로 판단된다.

제 5 장 정상류 하에서의 호안 차수시스템 차수성능 평가

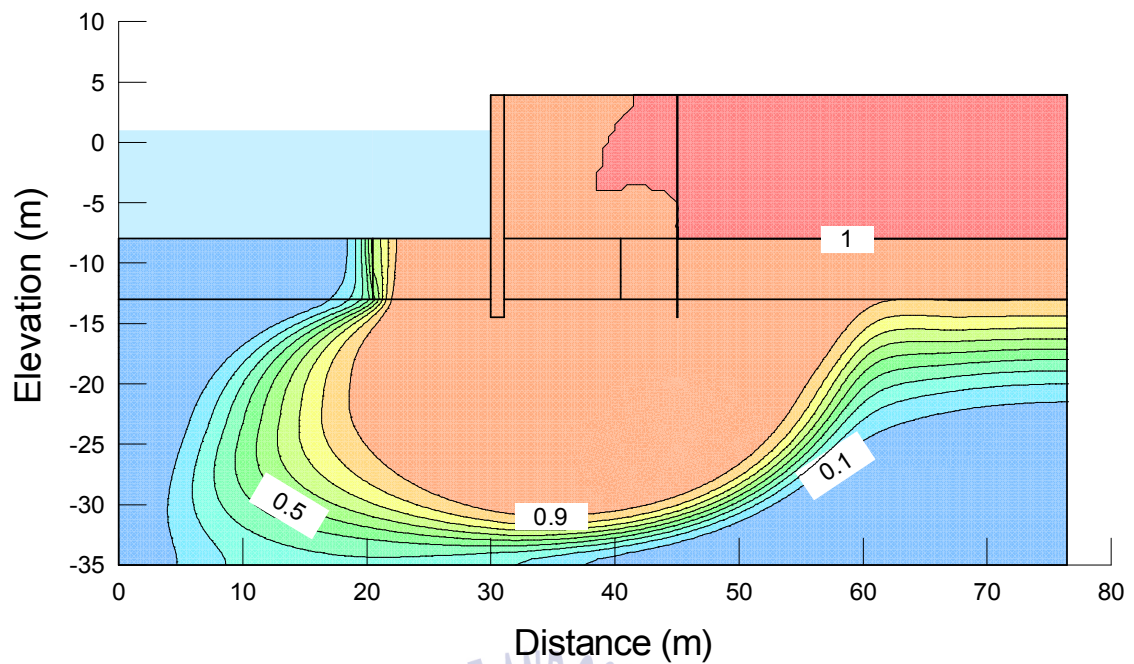
5.1 2중 연직벽체 호안

5.1.1 투수계수의 영향

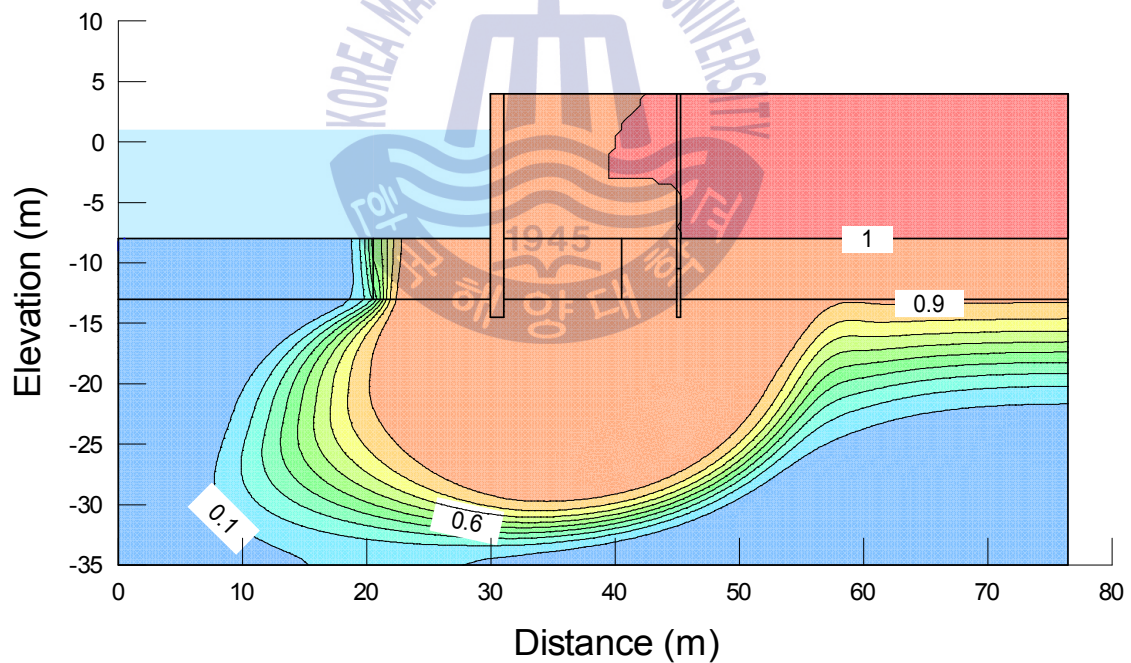
해상 폐기물매립장의 2중 연직벽체 호안의 측면 차수시스템 두께와 투수계수 및 차수 처리한 근입깊이에 대한 최적의 최소기준을 도출하기 위하여 본절에서는 투수계수와 두께가 변화할 때의 오염물질 누출량을 검토하였다. 검토를 위한 전체조건으로 앞 장에서 산정한 바닥 차수시스템의 최적의 두께 500cm, 투수계수 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 를 적용하고, 측면 차수시스템의 투수계수는 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 의 3가지로 적용한 후 측면 차수시스템의 두께를 총 8가지 경우(10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200)로 가정하여 침투·이류 분산해석을 수행하였다(Table 3.4).

Figs. 5.1 ~ 5.3에서는 세 가지 투수계수 측면 차수시스템의 해석두께 중 대표적으로 10cm, 30cm, 50cm, 100cm의 50년 경과 후 오염물 농도 분포를 나타내었다. 투수계수 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 의 경우 두께에 따라 농도의 차이는 있으나, 대부분 측면 차수시스템의 투수계수가 커서 벽체측으로 오염물이 이동하는 것으로 나타났다. $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 의 경우 벽체 두께가 얇은 10cm의 경우 벽체에서 해역으로 이동하는 것으로 나타났고, 두꺼워지면서 벽체 또는 바닥 차수시스템 방향으로 이동하는 것으로 나타났다. 투수계수 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 의 경우 이동범위가 매우 작아 오염물 이동 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Figs. 5.4 ~ 5.6에서 각각 바닥 측면 차수시스템의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 에 대한 두께 변화에 따른 50년 경과 후 누적누출량의 막대그래프를 나타낸다. 그림에서는 TW는 측면차수시스템의 두께를, K는 측면차수시스템의 투수계수를 나타낸다.



(a) $t=10\text{cm}$



(b) $t=30\text{cm}$

Figure 5.1 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ in double STSP type quay wall

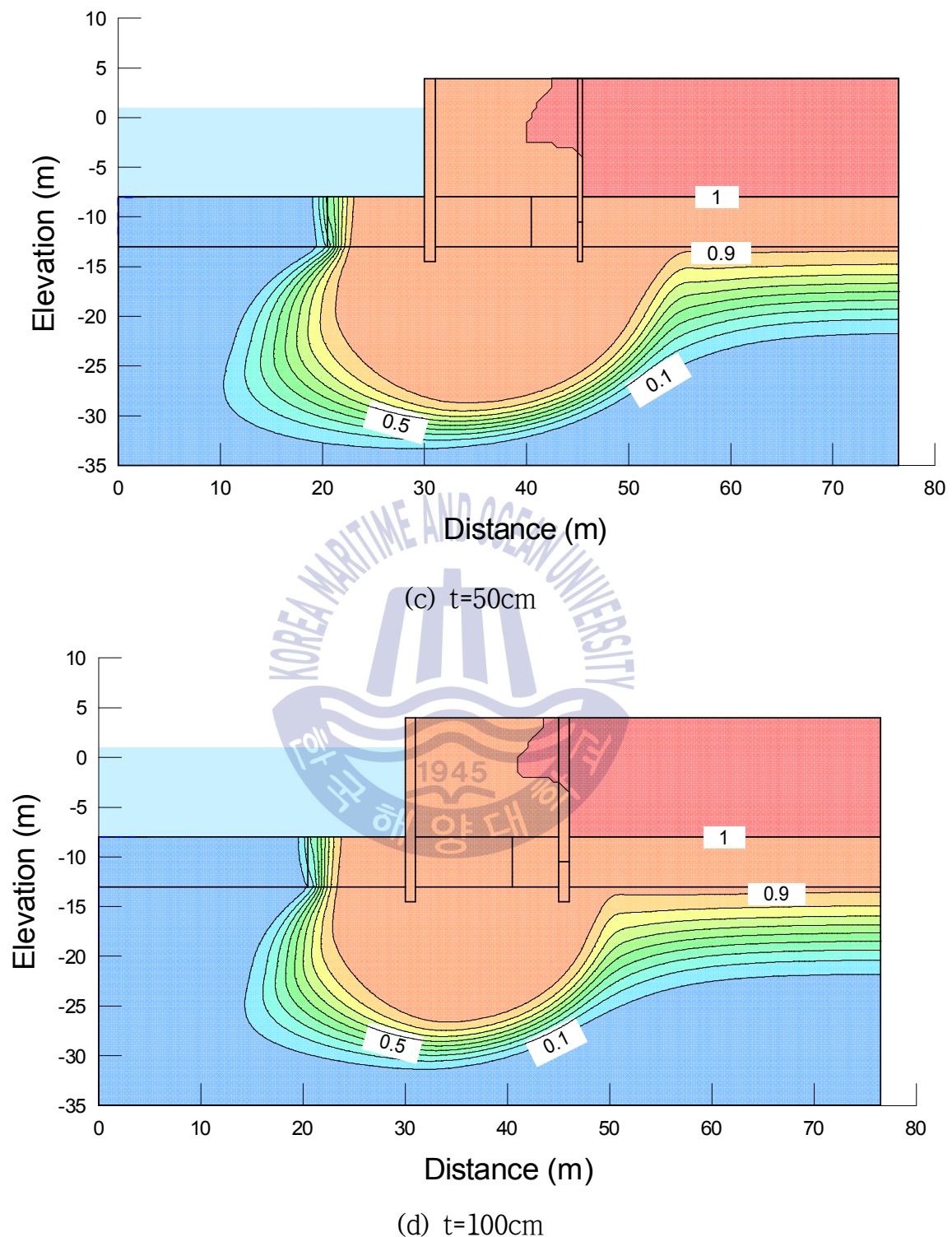
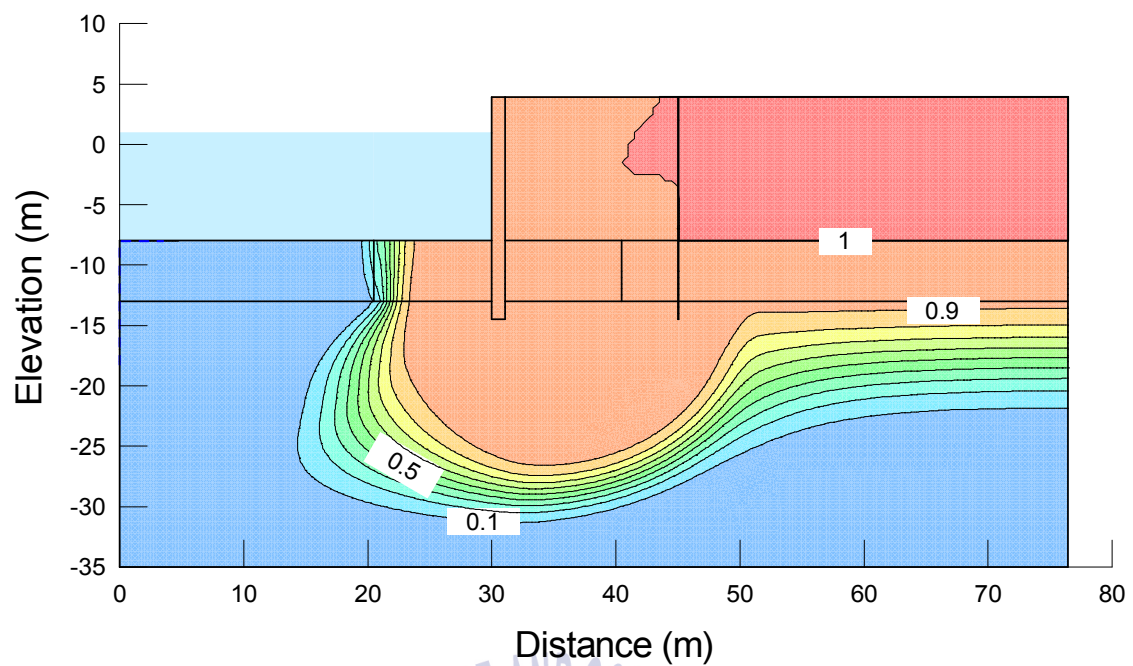
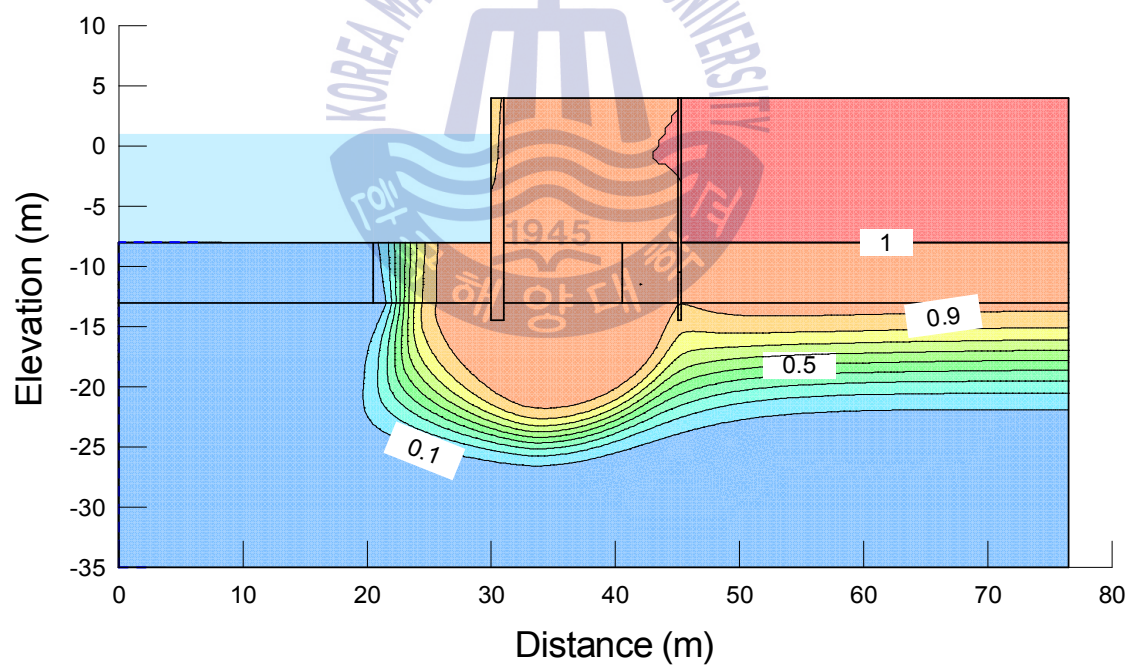


Figure 5.1 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ in double STSP type quay wall (continued)

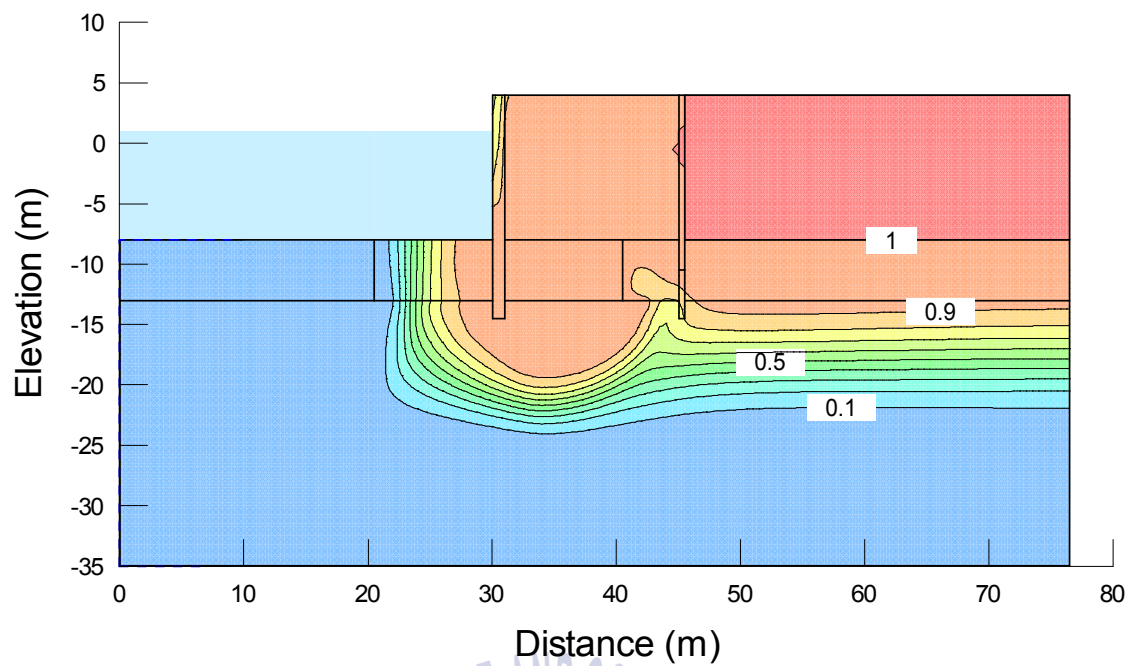


(a) $t=10\text{cm}$

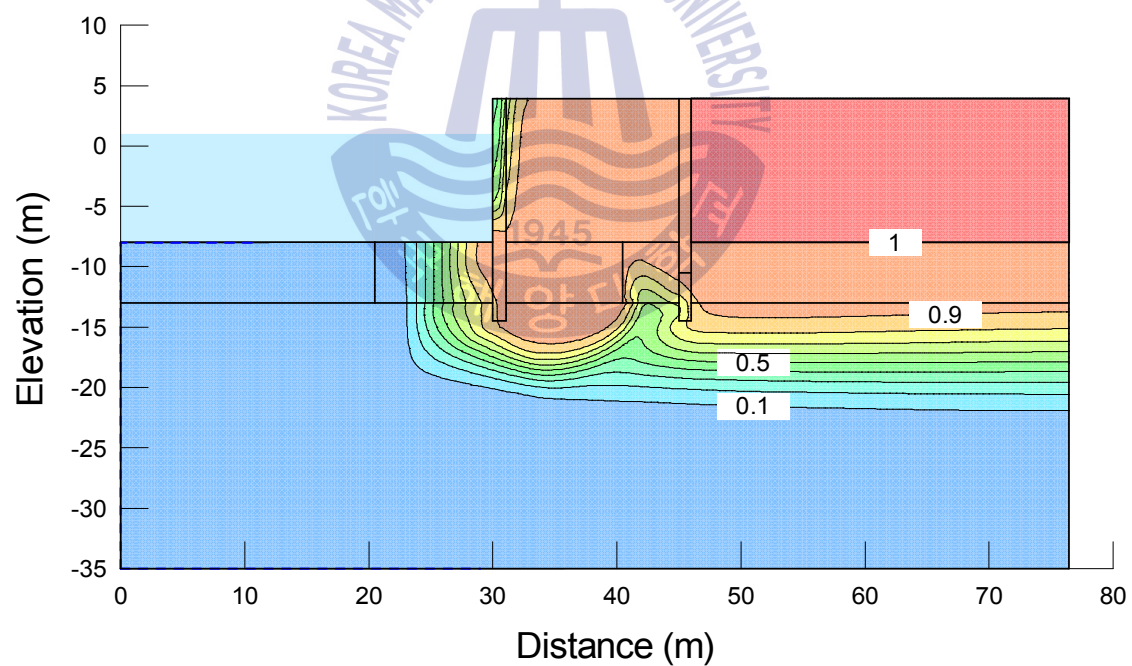


(b) $t=30\text{cm}$

Figure 5.2 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ in double STSP type quay wall

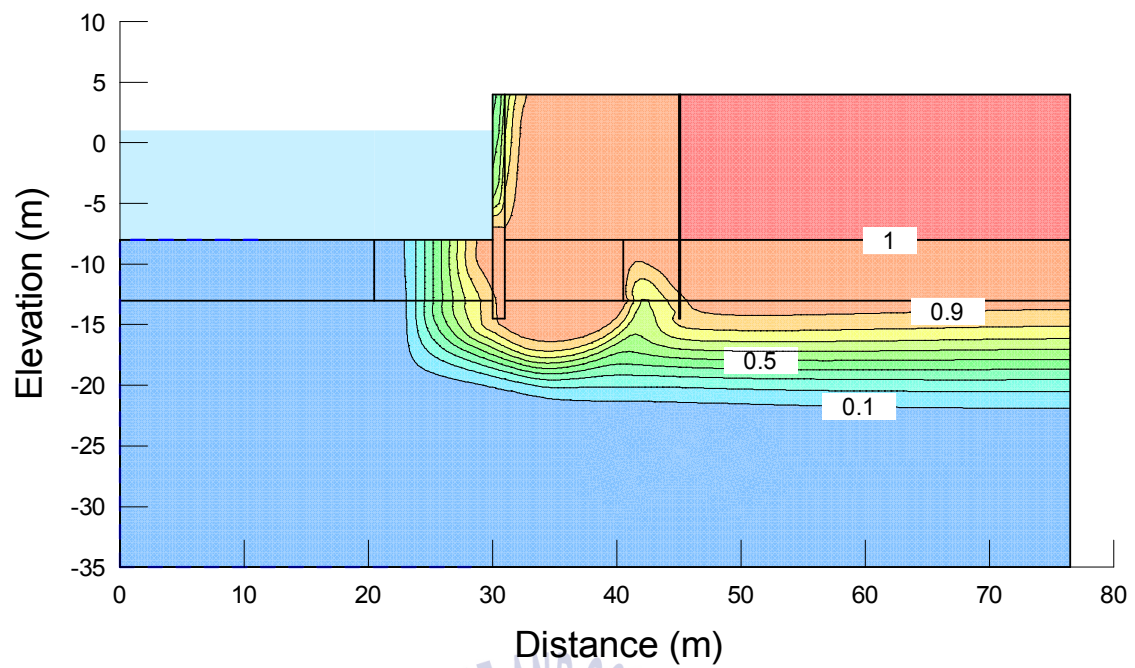


(c) $t=50\text{cm}$

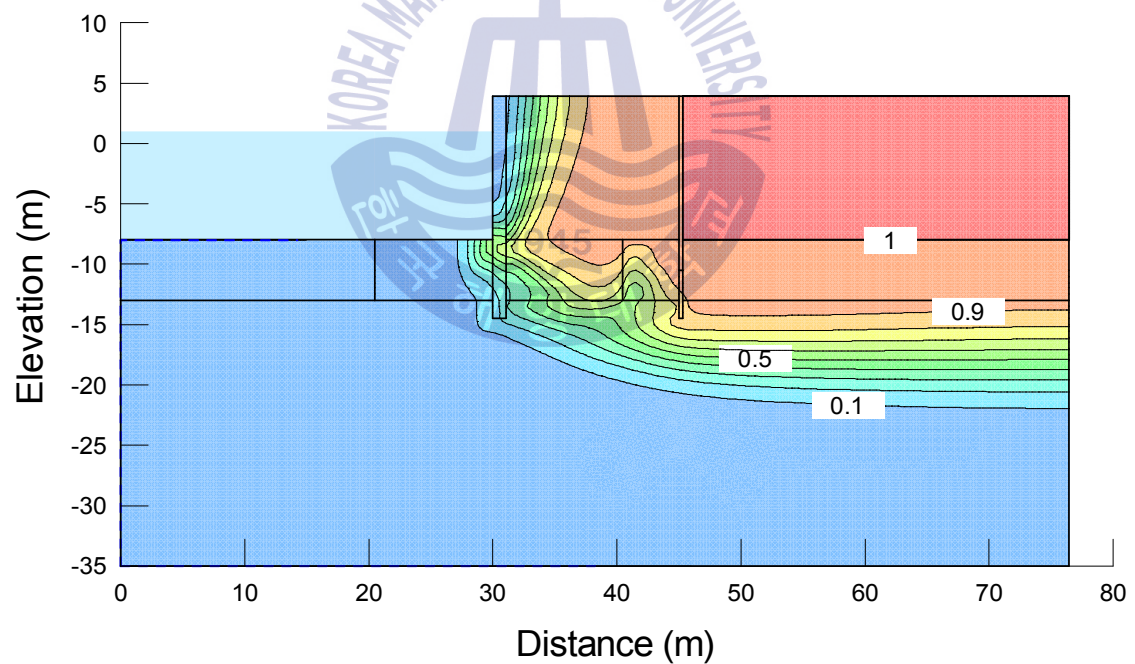


(d) $t=100\text{cm}$

Figure 5.2 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ in double STSP type quay wall (continued)

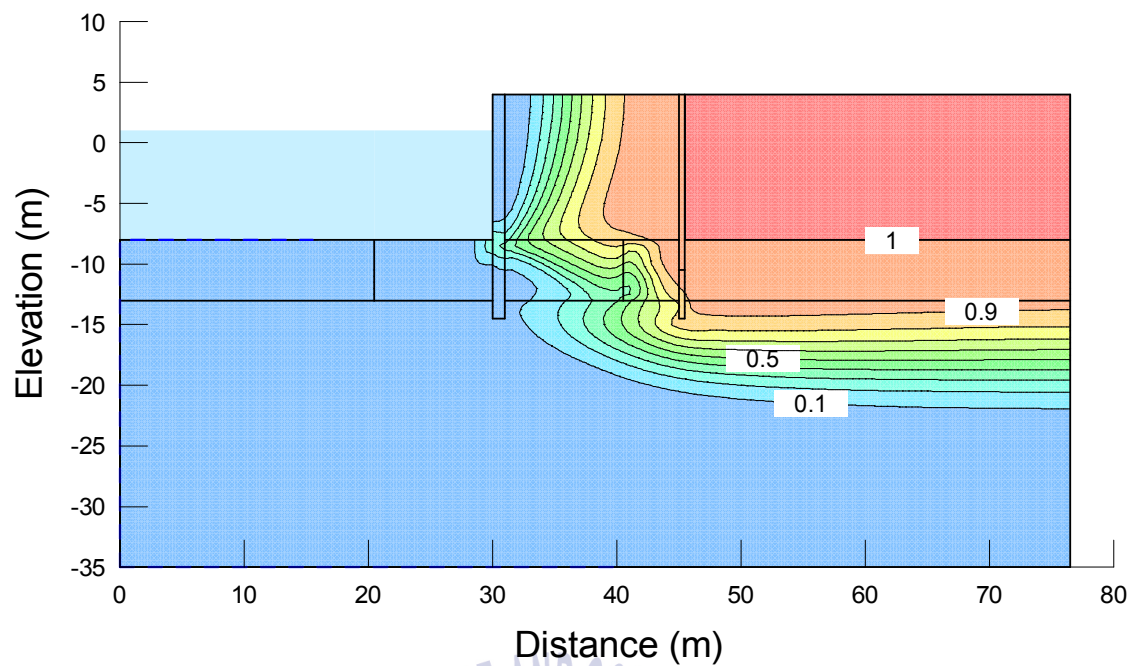


(a) $t=10\text{cm}$

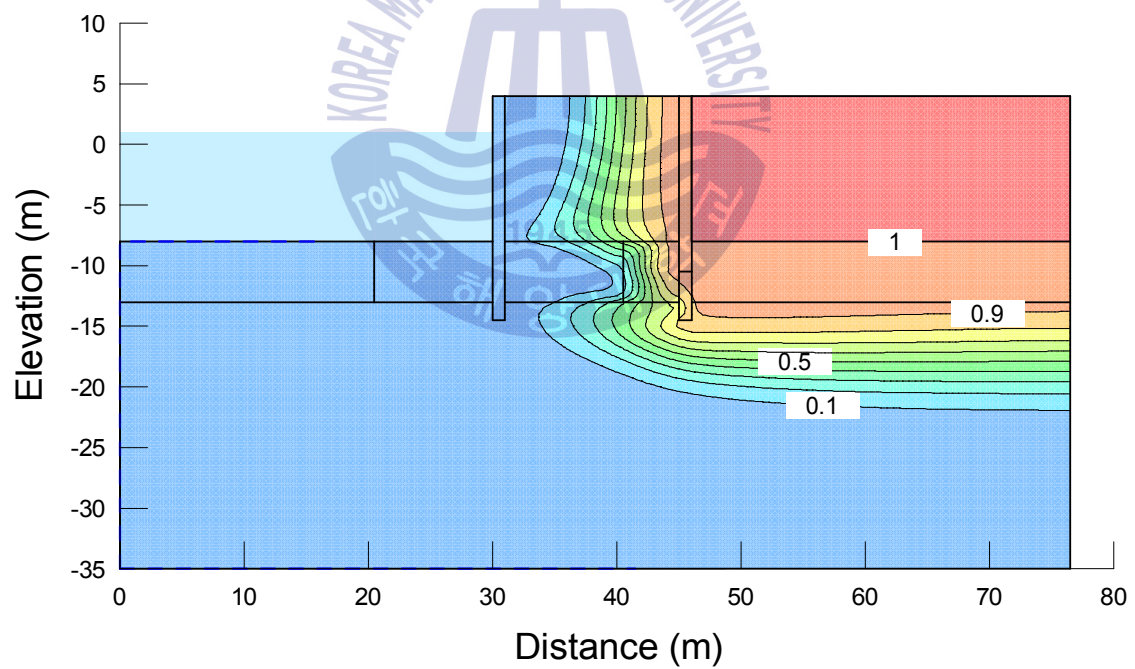


(b) $t=30\text{cm}$

Figure 5.3 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ in double STSP type quay wall



(c) $t=50\text{cm}$



(d) $t=100\text{cm}$

Figure 5.3 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ in double STSP type quay wall (continued)

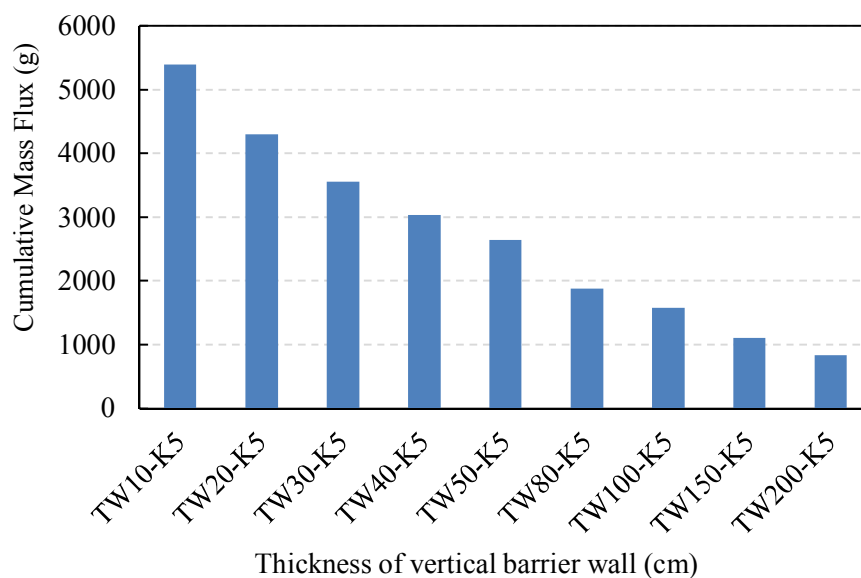


Figure 5.4 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

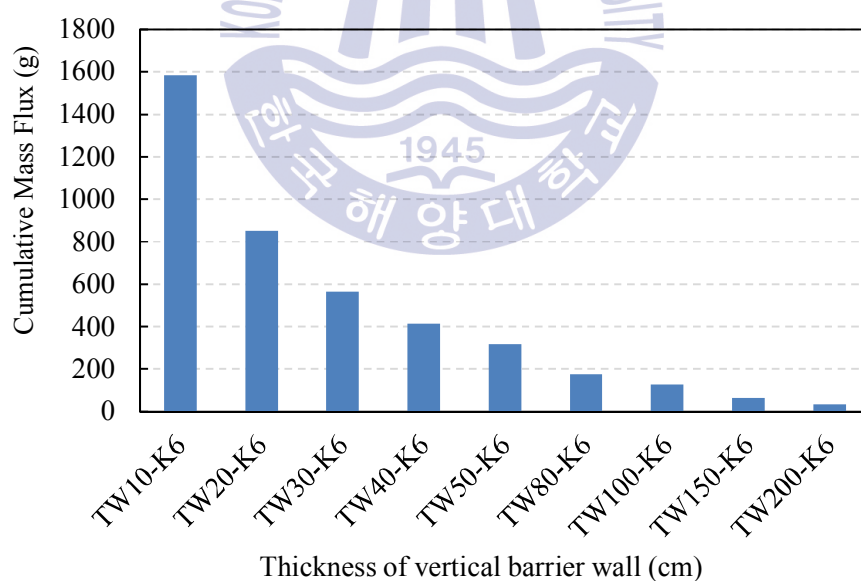


Figure 5.5 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$

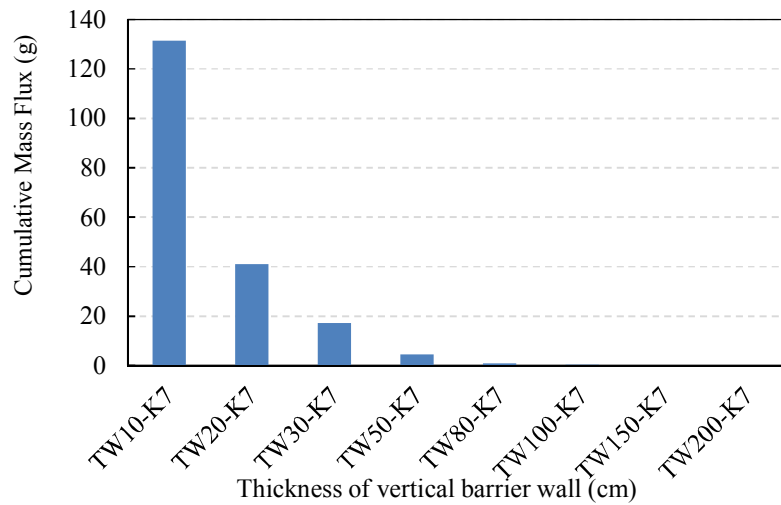


Figure 5.6 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$

Fig. 5.7은 세 가지 투수계수에 대한 50년 경과 누적누출량의 막대그래프를 비교한 것이다. $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 인 경우를 기준으로 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 및 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 일 때 누적누출량은 각각 약 87% 및 99% 감소하였고, 투수계수가 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 에서 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 으로 감소함에 따라 약 12%의 추가적인 누출량 감소를 보이고 있다.

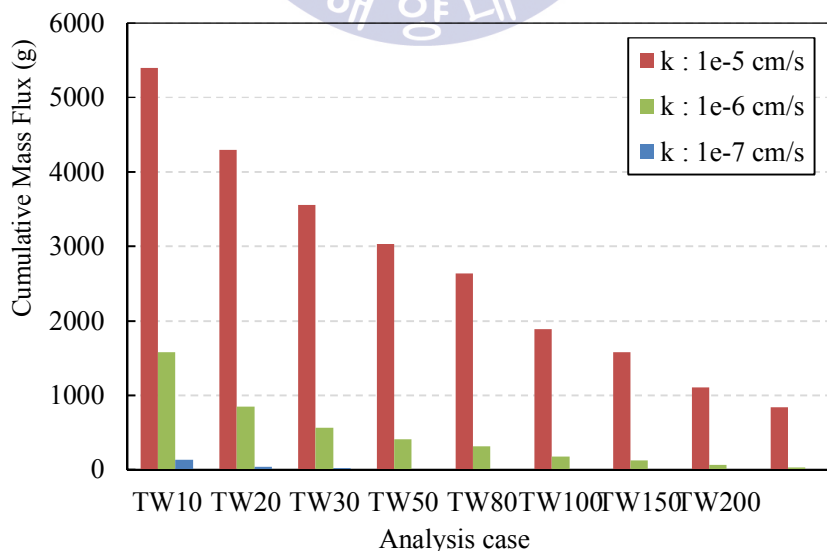


Figure 5.7 Comparison of cumulative mass flux during 50 years with different thickness and hydraulic conductivity of vertical barrier wall

5.1.2 두께 변화에 따른 오염물 분산영향

Figs. 5.8 ~ 5.10은 측면 차수시스템의 3가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 에 대한 측면 차수시스템의 두께 변화에 따른 50년 경과후 누적누출량을 나타낸다. 그림에서와 같이 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 에 대한 측면 차수시스템의 최적의 두께는 각각 30 ~ 46cm의 범위를 나타내고, 앞서 산정한 최적의 투수계수 최소기준 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 에 대한 최적의 두께는 41cm로 나타났다.

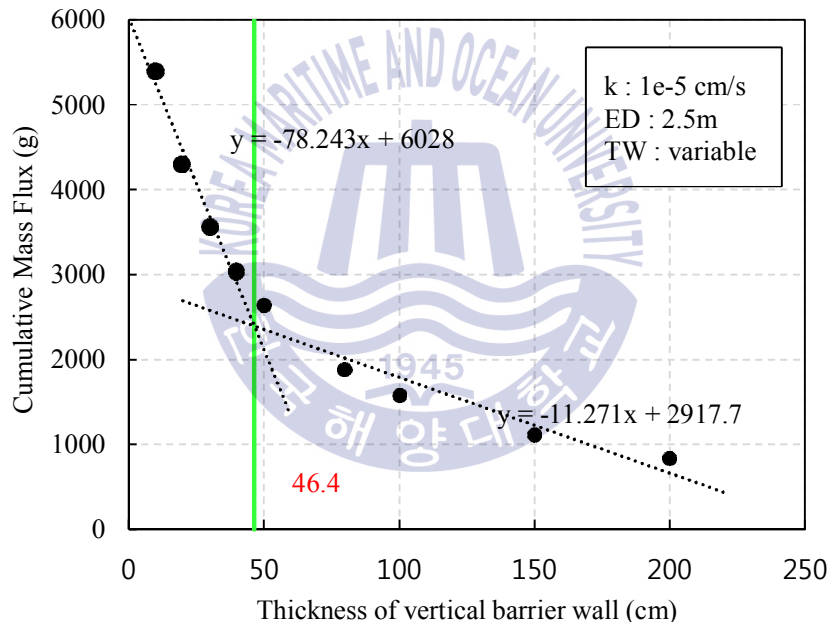


Figure 5.8 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$

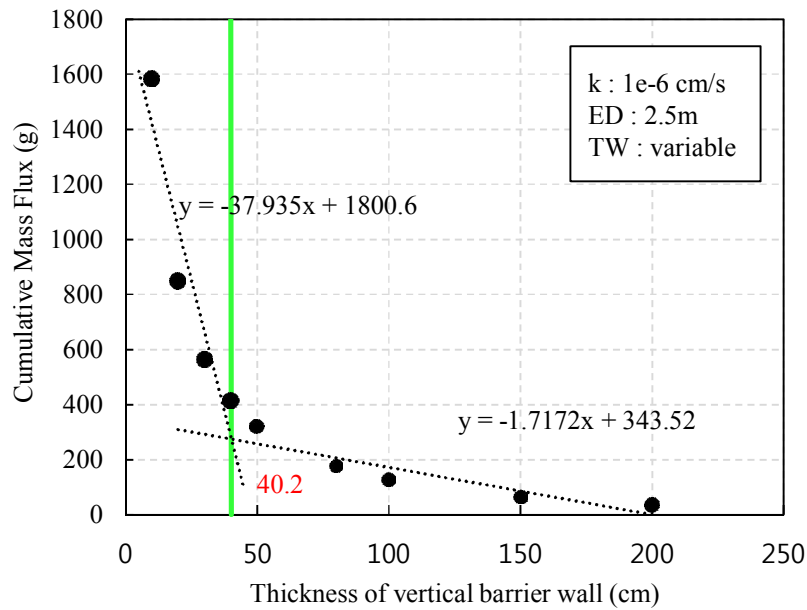


Figure 5.9 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$

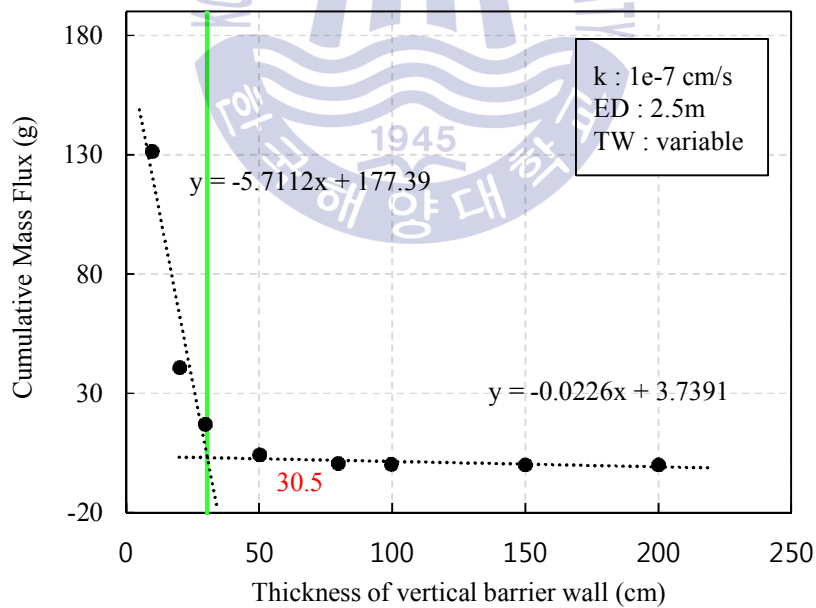


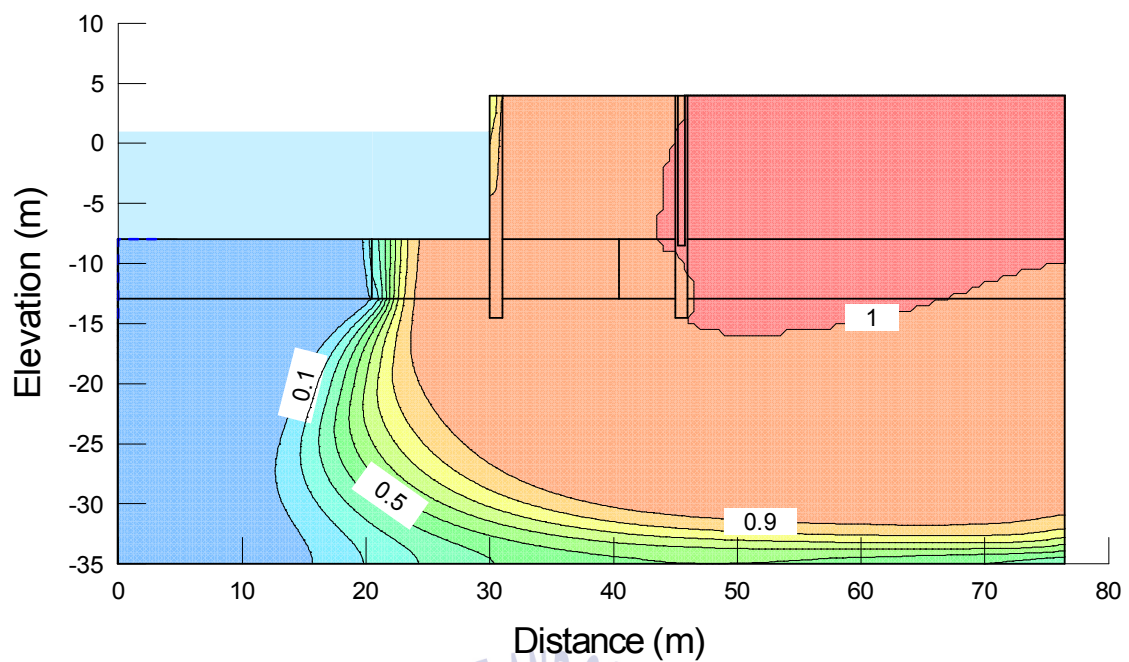
Figure 5.10 Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$

5.1.3 근입깊이에 따른 오염물 분산영향

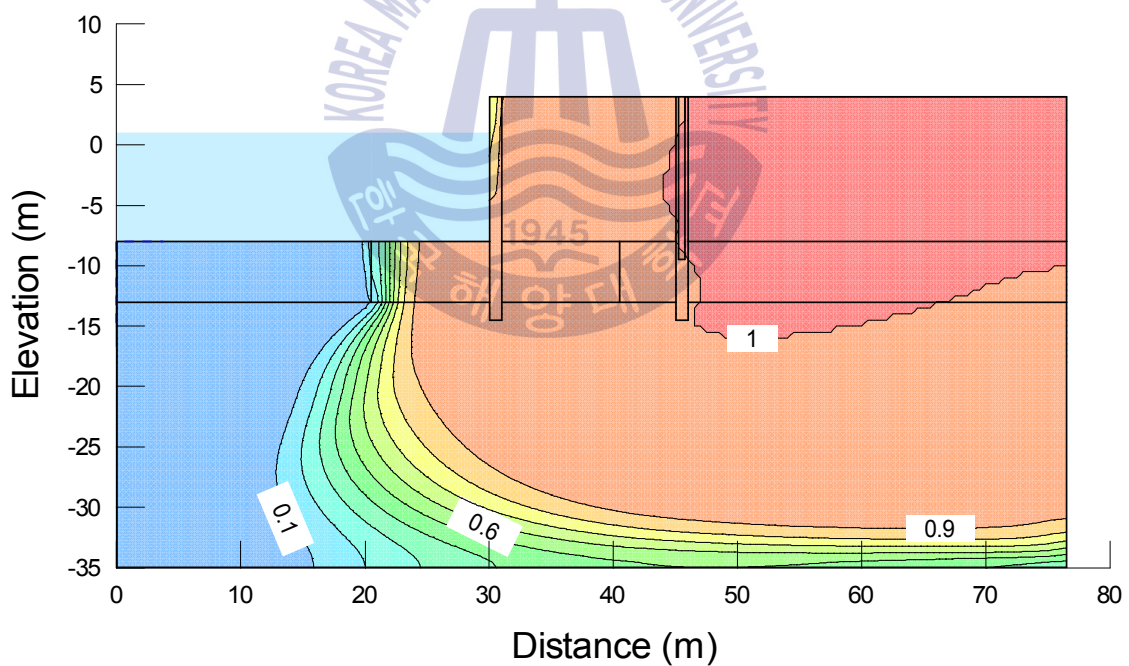
측면차수시스템으로 침출수의 유출을 완벽하게 차단하는 것은 비경제적이므로(Mitchell & Rumer, 1997) 측면 차수시스템의 최적의 차수 처리 근입깊이에 대한 최소기준을 평가할 필요가 있다. 본 절에서는 Table 3.5에 나타난 것처럼 바닥 차수시스템의 두께는 500cm, 측면 차수시스템의 투수계수와 두께는 각각 1×10^{-11} cm/s와 100cm로 고정하고, 바닥 차수시스템의 3가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대하여 측면 차수시스템의 차수처리 근입깊이의 변화에 따라 차수성능을 평가하였다.

Figs. 5.11 ~ 5.13에서는 측면 차수시스템의 세 가지 투수계수에서의 대표적으로 근입깊이에 대한 50년 경과 후 오염물 농도 분포를 나타내었다. 투수계수 1×10^{-5} cm/s의 경우 측면 벽체 및 바닥 차수시스템을 통과하여 이동되었으며, 근입깊이가 깊을수록 벽체 근입부에서 다소 떨어진 곳에서 바닥 차수시스템으로 이동되는 것으로 나타났다. 1×10^{-6} cm/s의 경우 측면 차수벽체와 바닥 차수시스템을 통해 이동되었으며, 투수계수 1×10^{-7} cm/s의 경우 근입깊이가 깊어질수록 바닥 차수시스템을 통해서는 거의 이동되지 않는 것으로 나타났다.

Figs. 5.14 ~ 5.16은 바닥 차수시스템의 각 투수계수에 대한 차수 처리 근입깊이에 따른 50년 경과 후의 누적누출량을 나타낸다. 그림에서처럼 바닥 차수시스템의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대하여 각각 199, 143, 50cm의 근입깊이가 최적인 것으로 나타났다.



(a) Embedment depth of 50cm



(b) Embedment depth of 150cm

Figure 5.11 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s in double STSP type quay wall

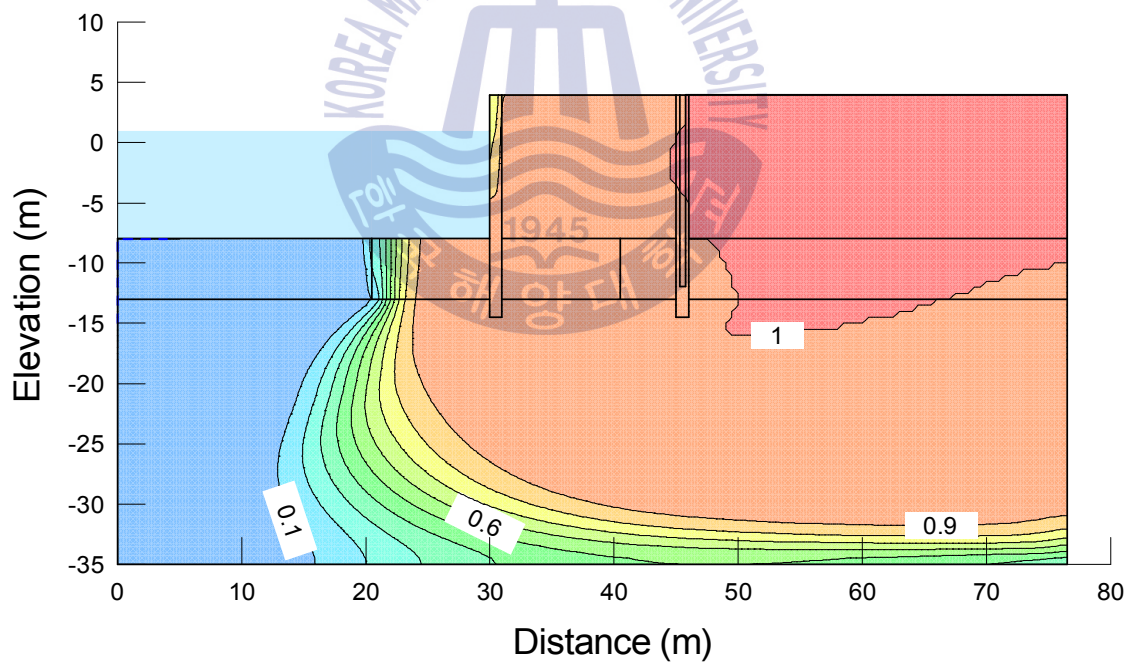
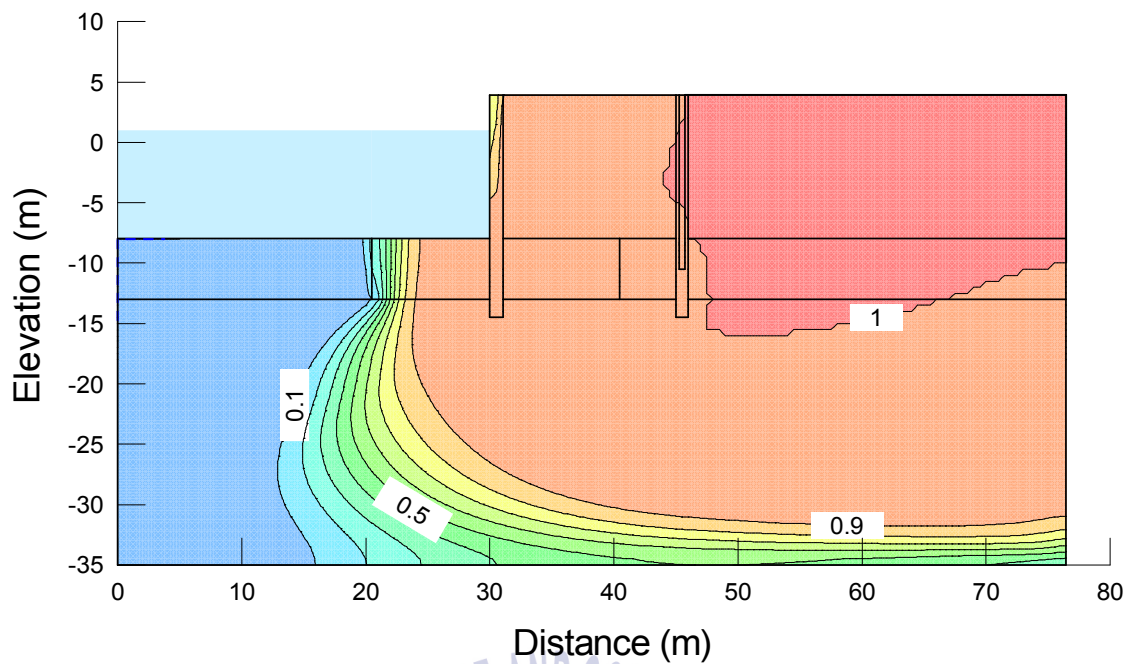
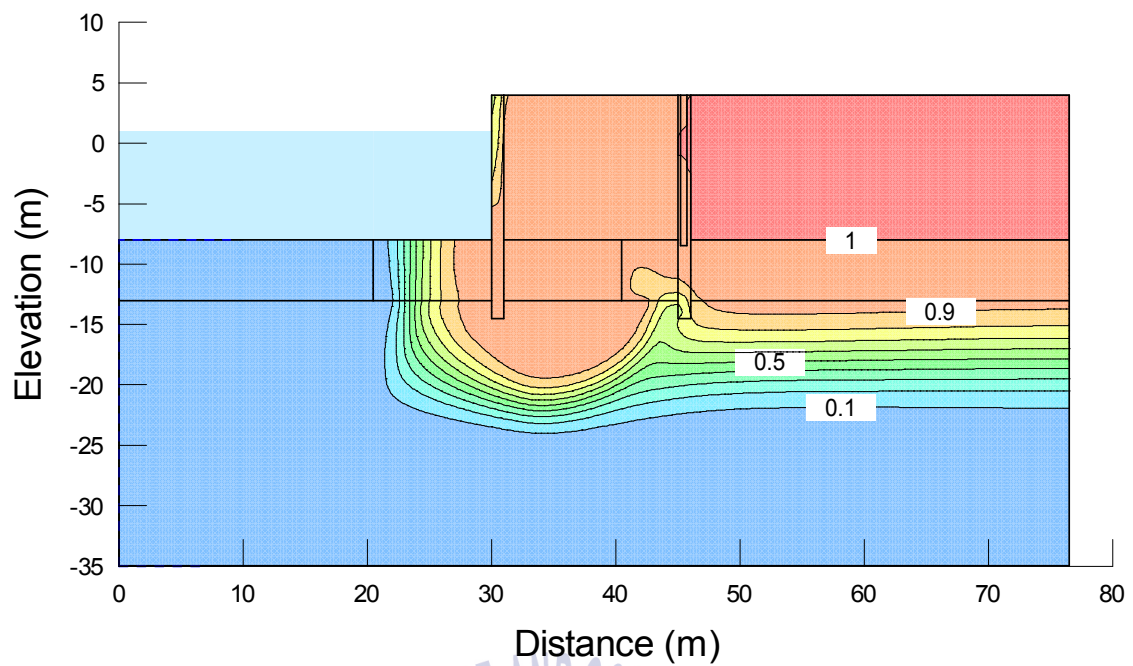
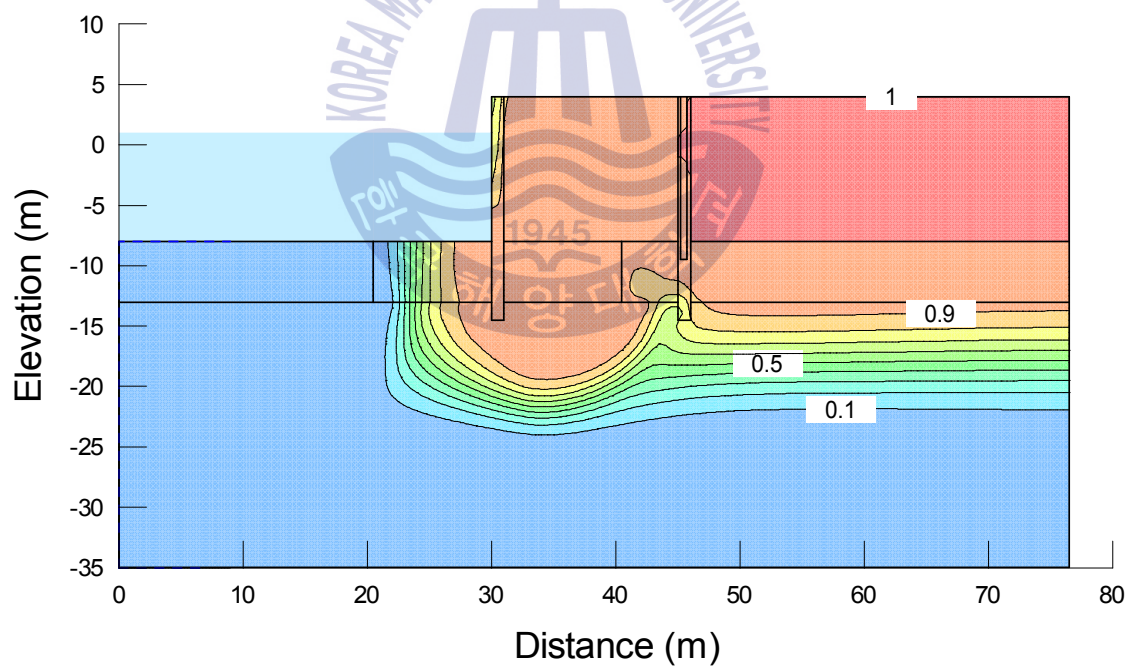


Figure 5.11 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ in double STSP type quay wall (continued)

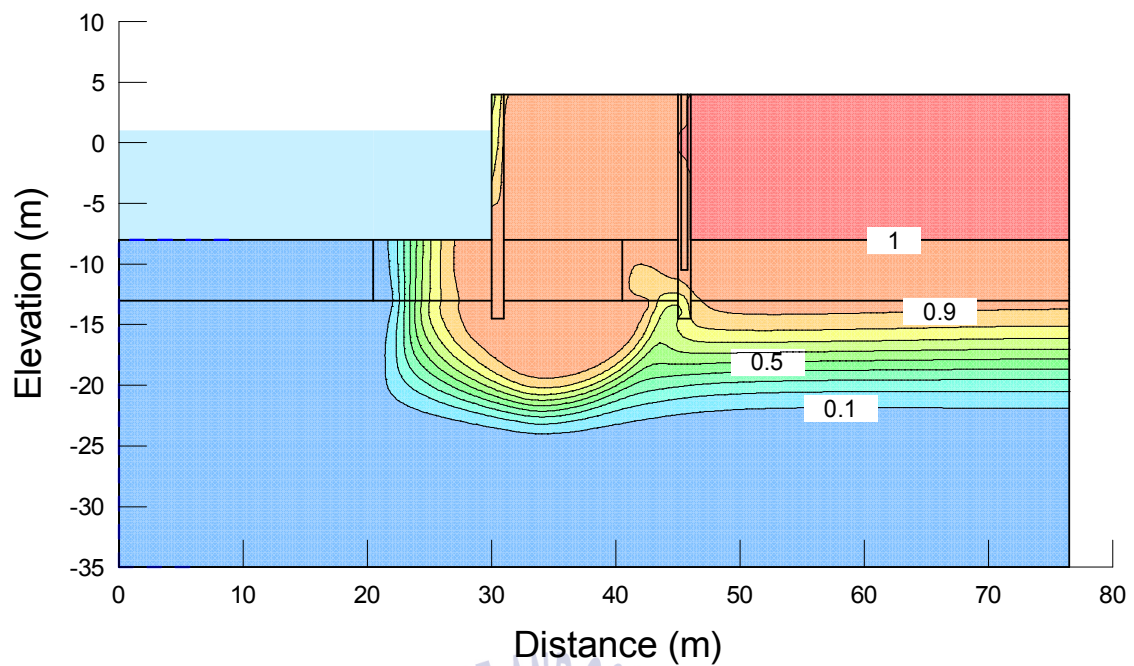


(a) Embedment depth of 50cm

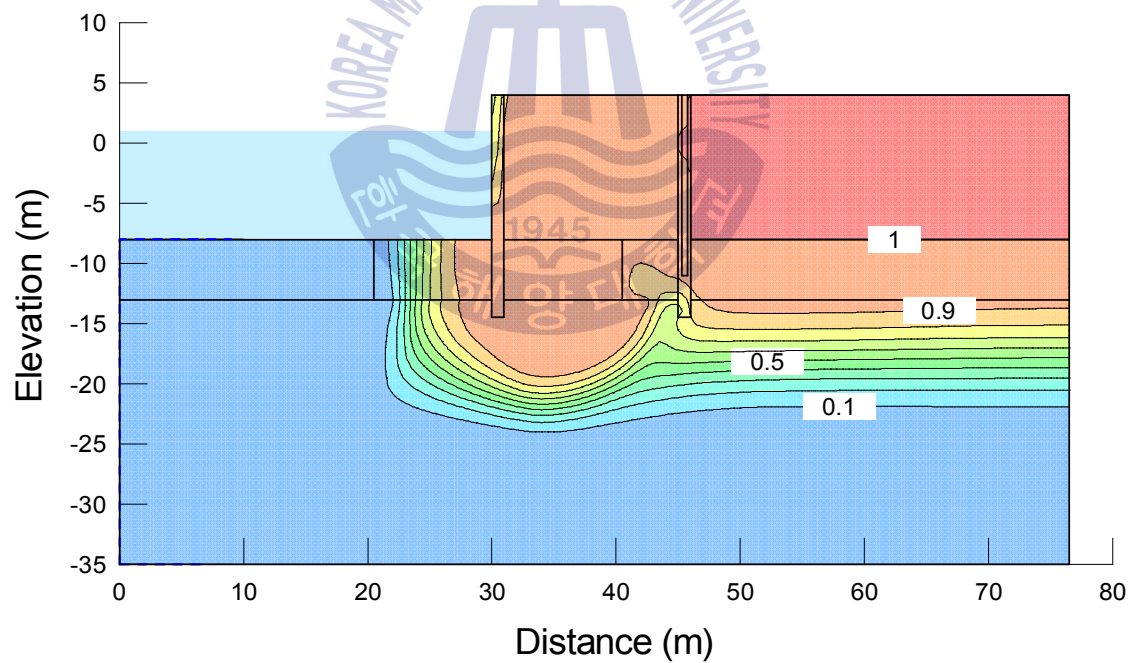


(b) Embedment depth of 150cm

Figure 5.12 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s in double STSP type quay wall

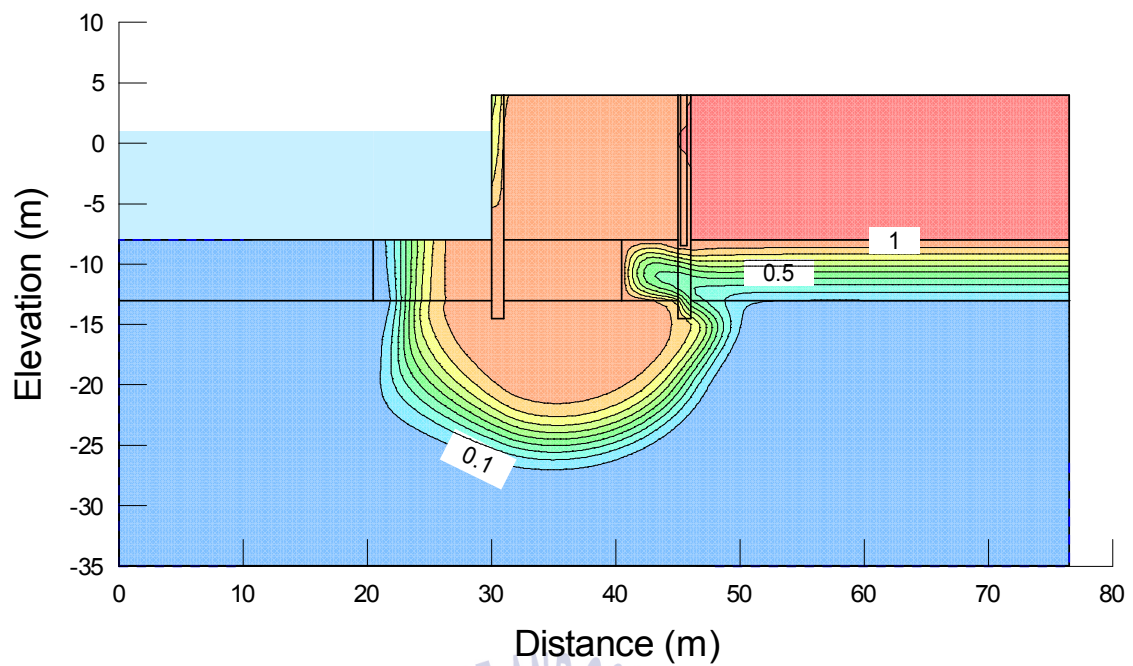


(c) Embedment depth of 250cm

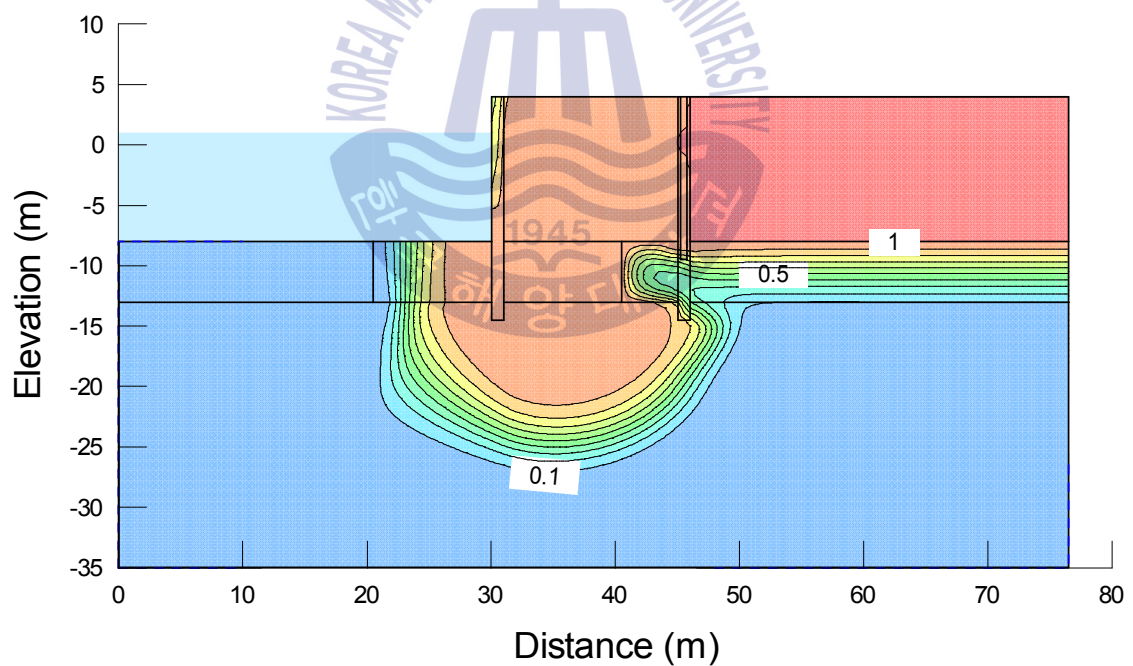


(d) Embedment depth of 300cm

Figure 5.12 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s in double STSP type quay wall (continued)

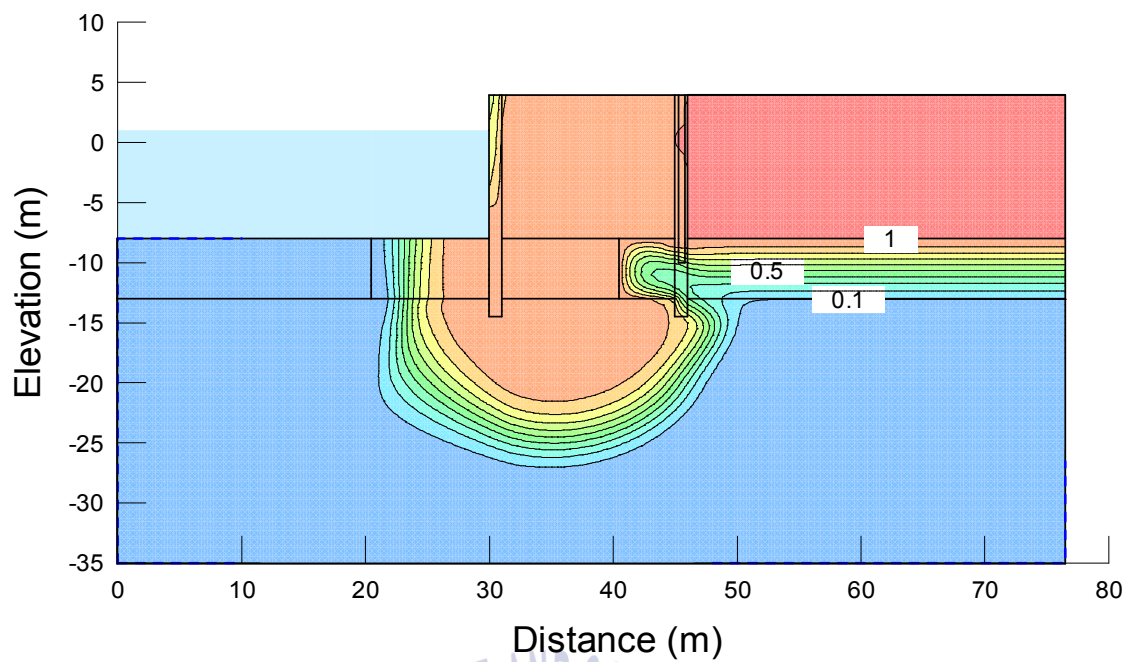


(a) Embedment depth of 50cm

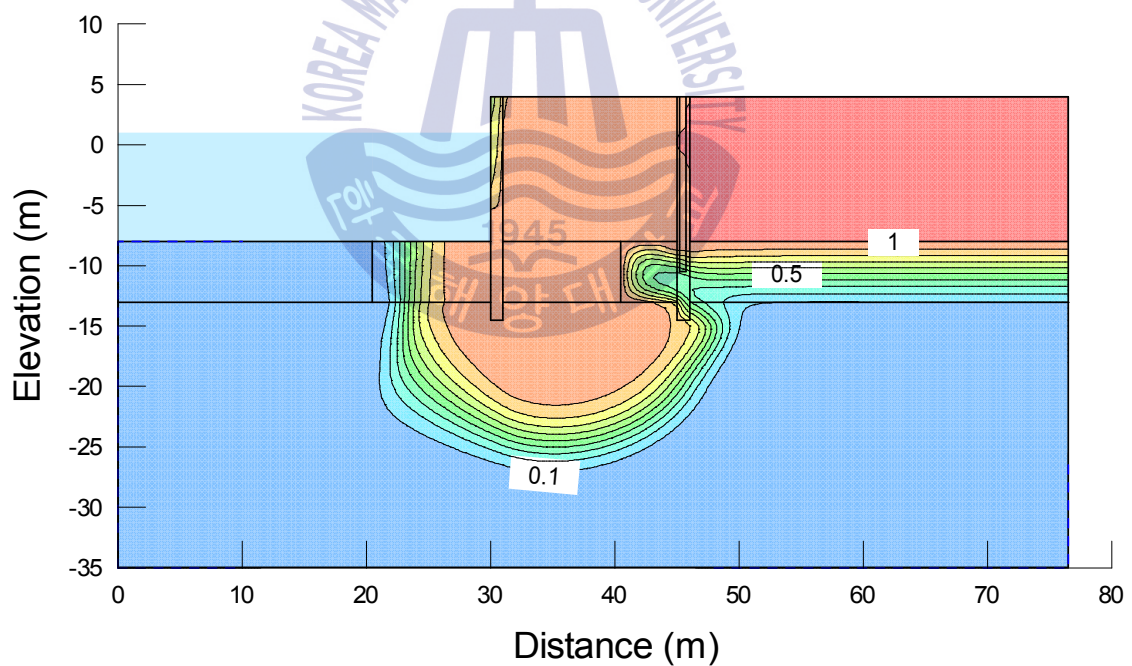


(b) Embedment depth of 150cm

Figure 5.13 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative three embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s in double STSP type quay wall



(c) Embedment depth of 200cm



(d) Embedment depth of 250cm

Figure 5.13 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative four embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s in double STSP type quay wall (continued)

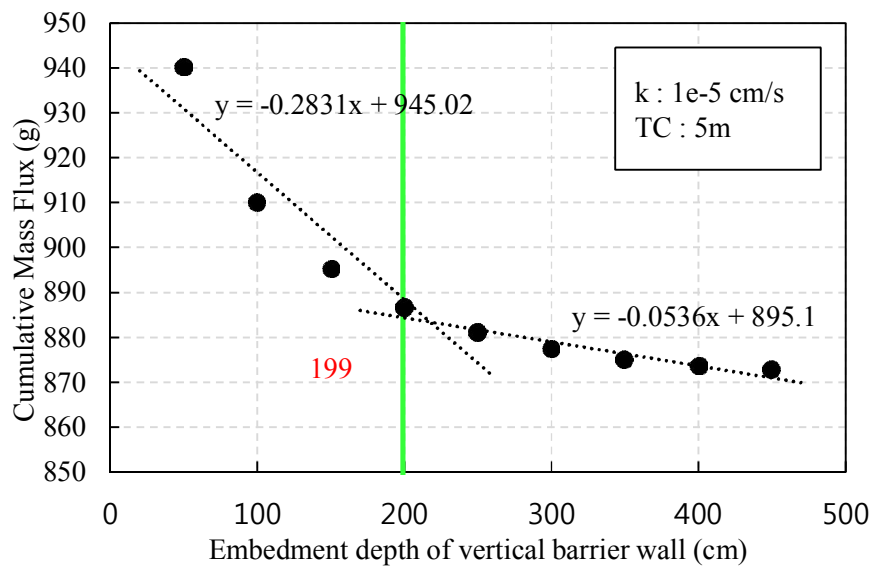


Figure 5.14 Cumulative mass flux during 50 years with different embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

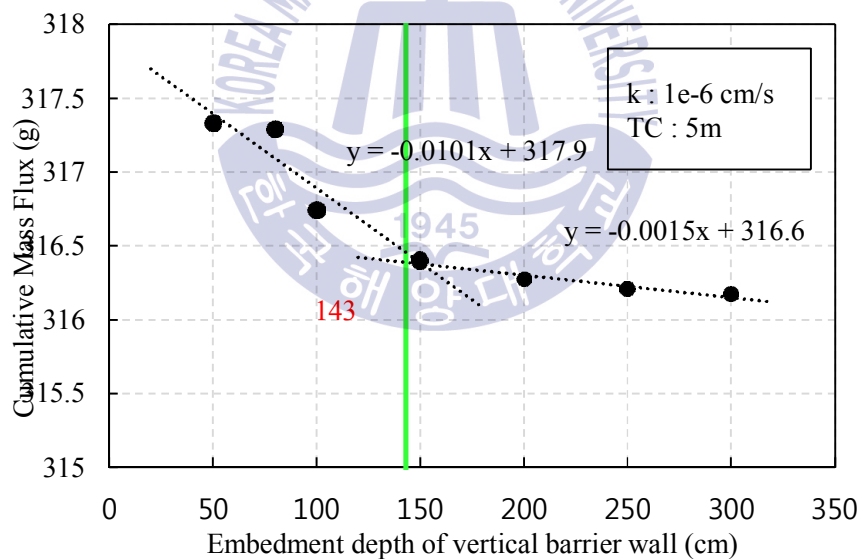


Figure 5.15 Cumulative mass flux during 50 years with different embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$

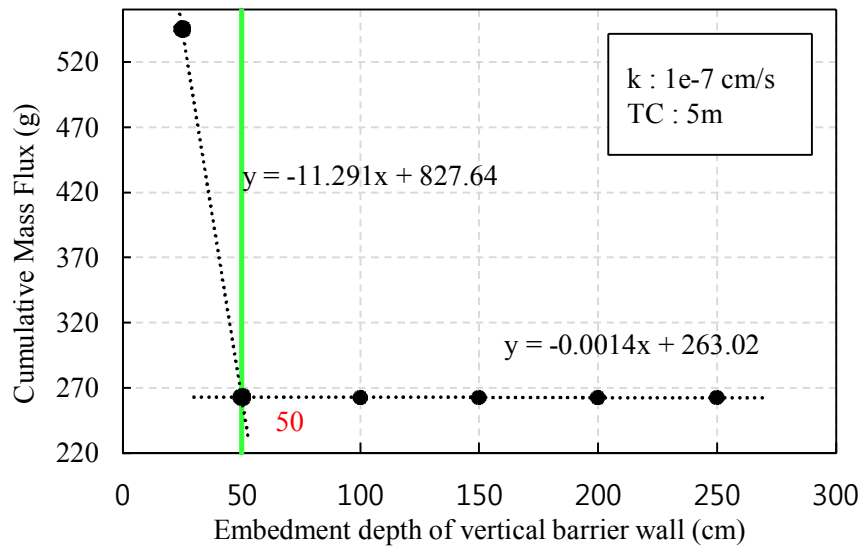


Figure 5.16 Cumulative mass flux during 50 years with different embedment depth of vertical barrier wall with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$



5.1.4 소결

해상 폐기물매립장의 2중 연직벽체로 이루어진 호안에서의 측면 벽체 차수공의 두께 및 투수계수와 차수성능상의 근입깊이에 대한 최적의 최소기준을 도출하기 위하여 바닥 차수시스템으로 이용되는 불투수성 해저 점성토지반의 두께 및 투수계수를 각각 500cm 및 1×10^{-6} cm/s로 측면 차수시스템의 차수성능상의 근입깊이를 250cm로 고정하고 측면 차수공에 대하여 3가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 두께를 6가지 경우(20, 50, 80, 100, 150, 200cm)로 하여 해석을 수행하였다.

투수계수는 1×10^{-5} cm/s인 경우를 기준으로 1×10^{-6} cm/s 및 1×10^{-7} cm/s일 때 누적누출량은 각각 약 87% 및 99% 감소하였고, 투수계수가 1×10^{-6} cm/s에서 1×10^{-7} cm/s으로 감소함에 따라 약 12%의 추가적인 누출량 감소를 보이고 있으며, 그 효과가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 측면 차수시스템의 투수계수에 대한 최적의 최소기준은 1×10^{-6} cm/s가 합리적인 것으로 판단된다.

앞서 산정한 최적의 투수계수 최소기준 1×10^{-6} cm/s에 대한 최적의 두께는 41cm로 나타났다. 측면 차수시스템의 차수 처리의 시공 상의 불확실성을 고려하여 약 30%의 여유를 두어 측면 차수시스템의 최적의 두께에 대한 최소기준을 50cm로 산정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 또한, 이 경우 3가지 투수계수에 대한 두께 범위를 모두 만족하므로 측면 차수시스템의 두께 기준으로 적합할 것으로 판단된다.

바닥 차수시스템에 대한 투수계수의 최소기준인 1×10^{-6} cm/s에 대응하여 151cm가 합리적일 것으로 판단되며, 지반의 불균질성을 고려하여 30%의 여유를 두어 250cm가 합리적일 것으로 판단된다. 특히, 이 경우 바닥 차수시스템의 투수계수가 1×10^{-5} cm/s인 경우도 만족하므로 지반의 불균질성을 고려한 측면 차수시스템의 차수처리 근입깊이로 최적의 최소기준이라고 판단된다.

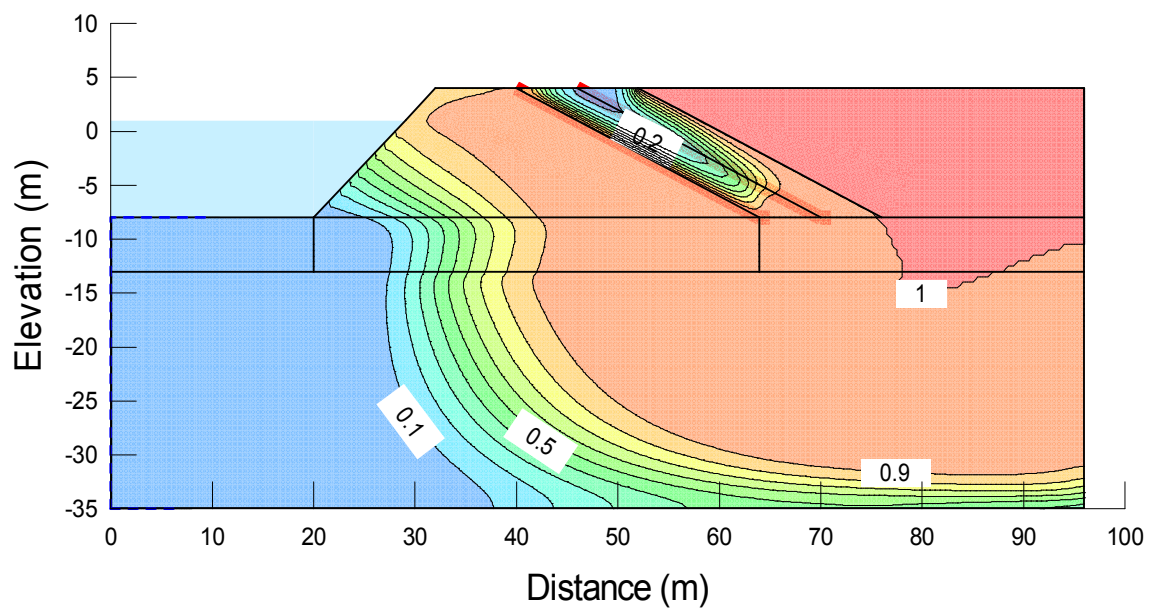
5.2 경사제식 호안

5.2.1 차수시트의 연장길이에 따른 오염물 분산영향

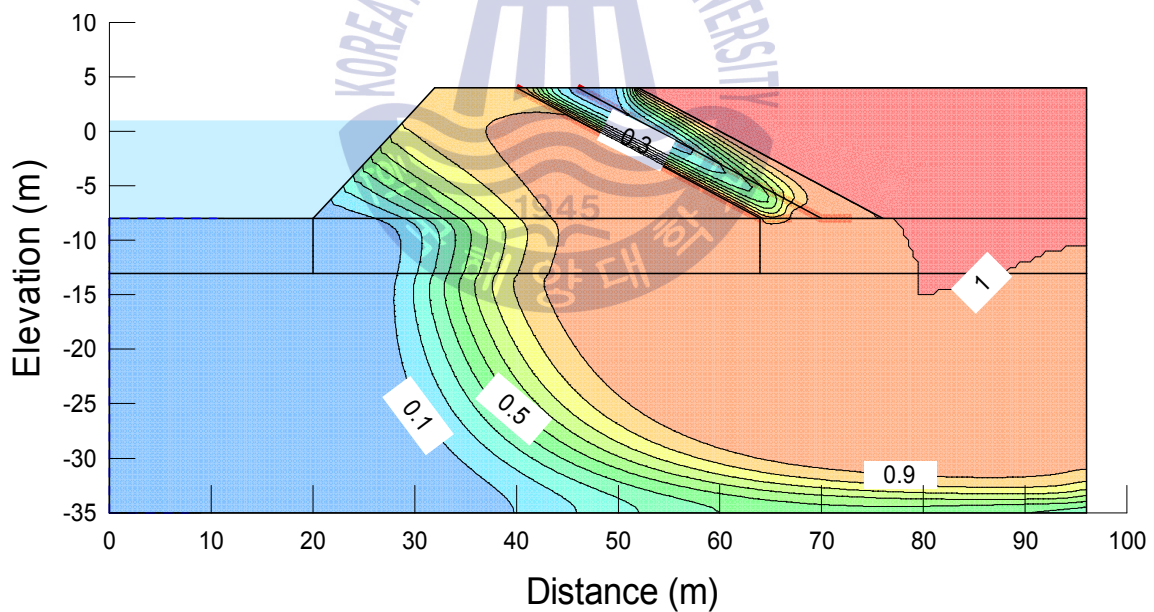
경사제식 호안에서 차수시트 설치범위를 도출하기 위하여 앞장에서 산정한 바닥 차수시스템의 두께를 500cm로 고정하고, 바닥 차수시스템의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 점성토층과 접하는 부분의 차수시트 설치 길이 6.0m를 0.5m간격으로 12가지 경우(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0m)에 대한 50년 경과 후 누적누출량을 비교하였다.

Figs. 5.17 ~ 5.19에서는 바닥 차수시스템의 세 가지 투수계수에 대해 차수시트 설치길이를 변화하여 해석한 결과 중 대표적으로 1.0m, 3.0m, 5.0m, 6.0m의 50년 경과 후 오염물 농도 분포를 나타내었다. 투수계수 1×10^{-5} cm/s의 경우 차수시트 설치길이에 비례적으로 오염물의 농도의 차이가 나는 것으로 나타났다. 즉, 차수시트 설치길이가 길어질수록 오염물 농도 변화가 서서히 줄어드는 것으로 나타났다. 1×10^{-6} cm/s는 차수시트 길이가 길어질수록 오염물 농도 변화가 거의 없는 것으로 나타났고, 1×10^{-7} cm/s의 경우 설치길이에 따른 오염물 농도 변화가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Figs. 5.20 ~ 5.22는 바닥 차수시스템의 3가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 점성토층과 접하는 부분의 길이 변화에 따른 50년 경과후 누적누출량을 나타낸다. 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대한 점성토층과 접하는 부분 차수시트의 최적의 연장길이는 각각 3.16~2.96m의 범위를 나타내고, 앞서 산정한 최적의 투수계수 최소기준 1×10^{-6} cm/s에 대한 최적의 연장길이는 3.16m로 나타났다. 투수계수 1×10^{-5} cm/s에서는 차수시트가 길어짐에 따라 그 비율만큼 유출량이 줄어드는 것으로 나타났다.

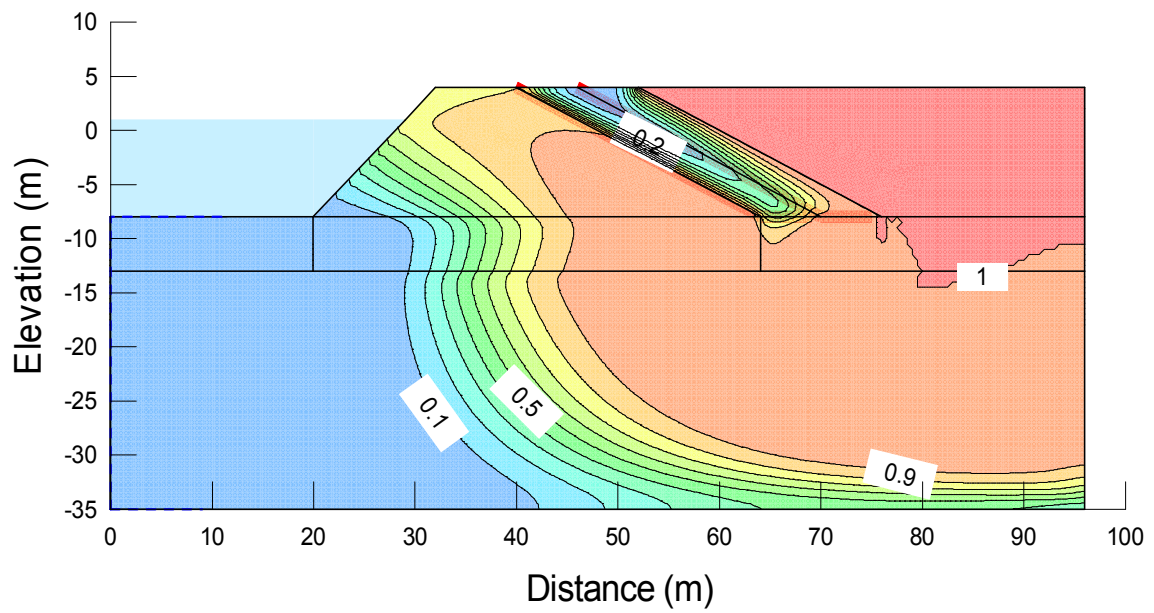


(a) Extended length of 1.0m

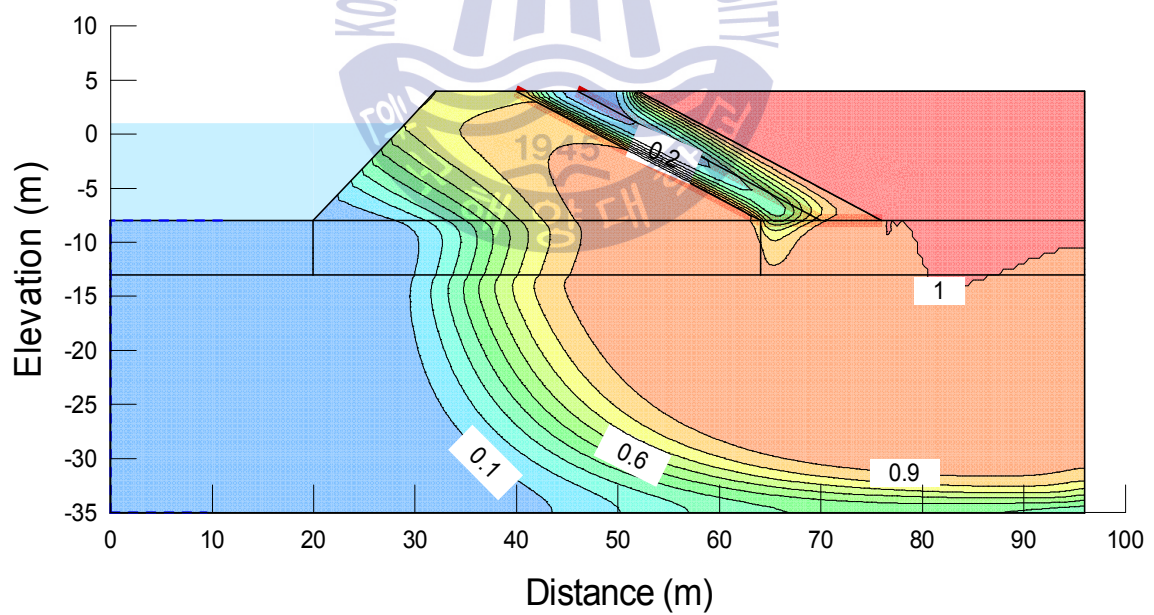


(b) Extended length of 3.0m

Figure 5.17 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative four extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ in rubble mound type quay wall

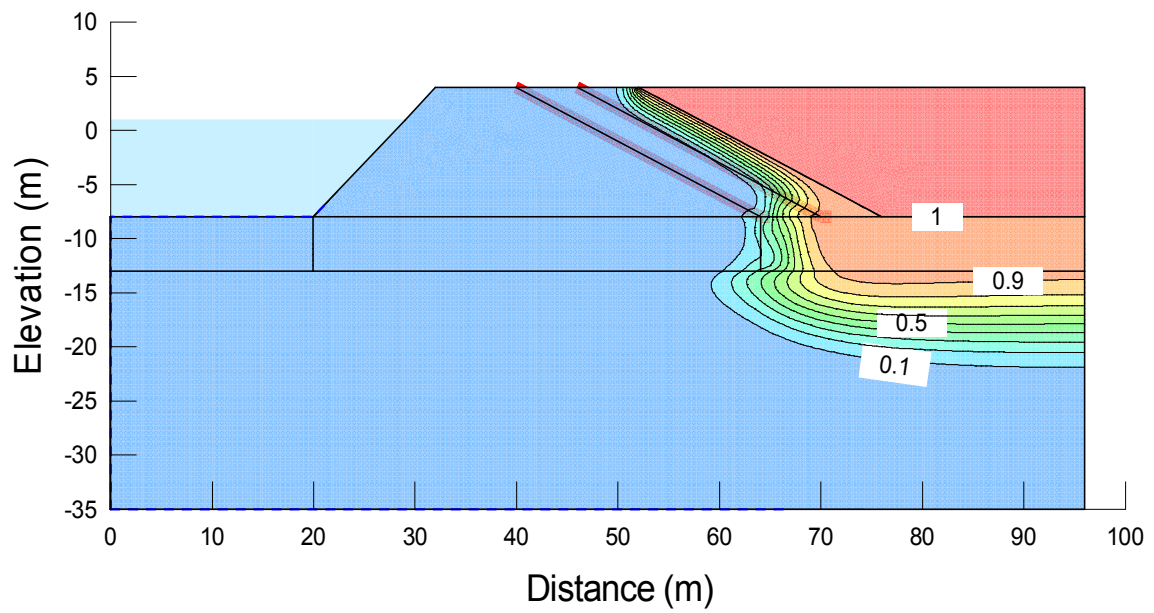


(c) Extended length of 5.0m

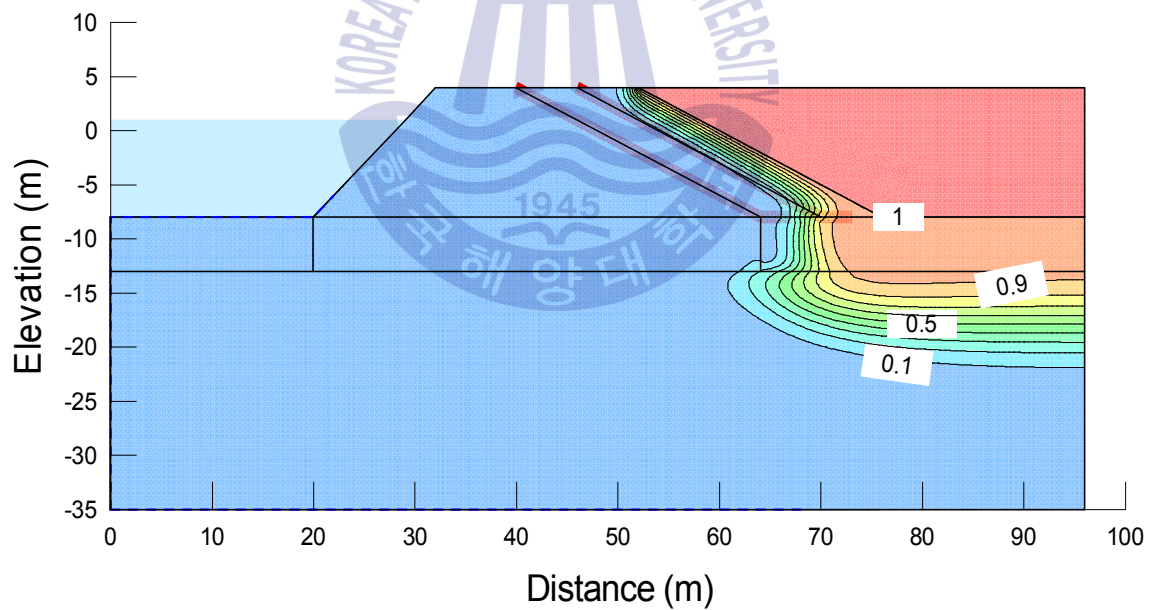


(d) Extended length of 6.0m

Figure 5.17 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative four extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ in rubble mound type quay wall (continued)

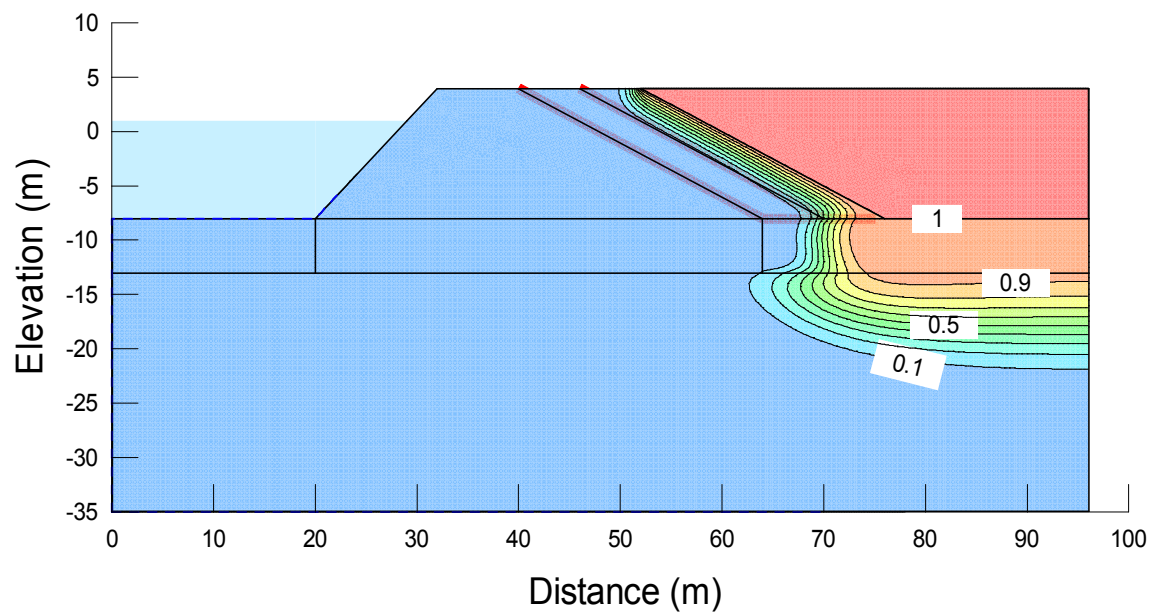


(a) Extended length of 1.0m

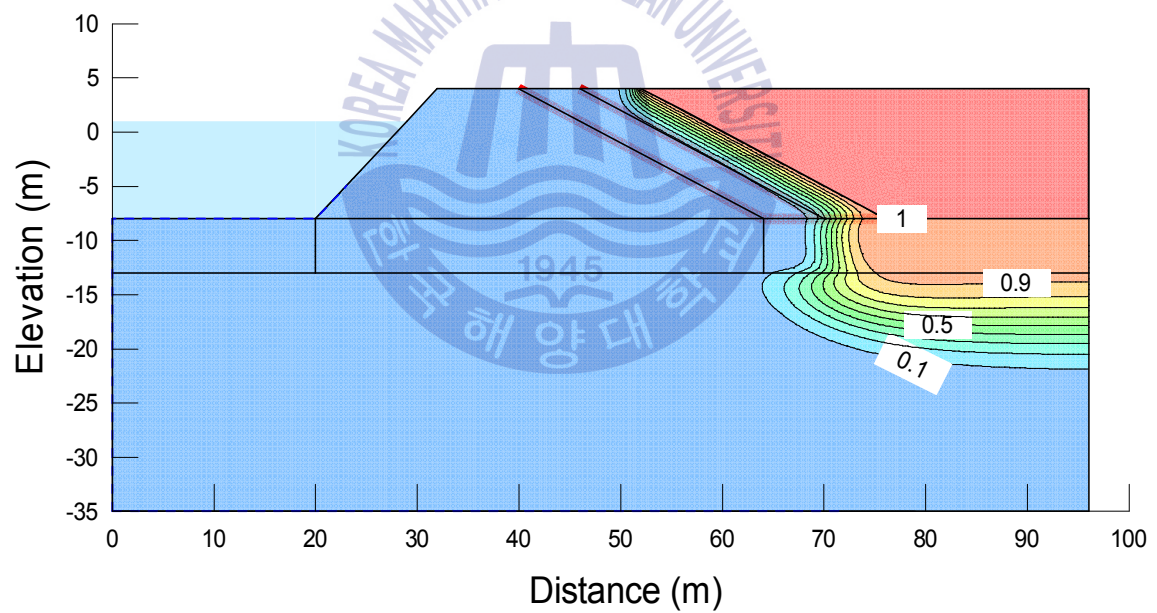


(b) Extended length of 3.0m

Figure 5.18 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative four extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ in rubble mound type quay wall

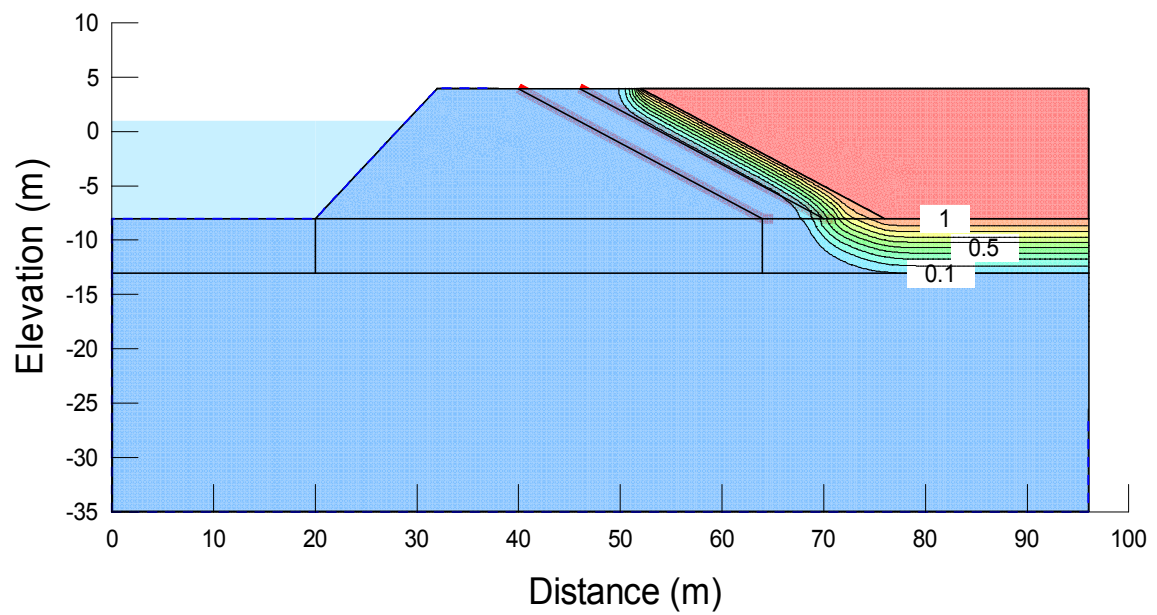


(c) Extended length of 5.0m

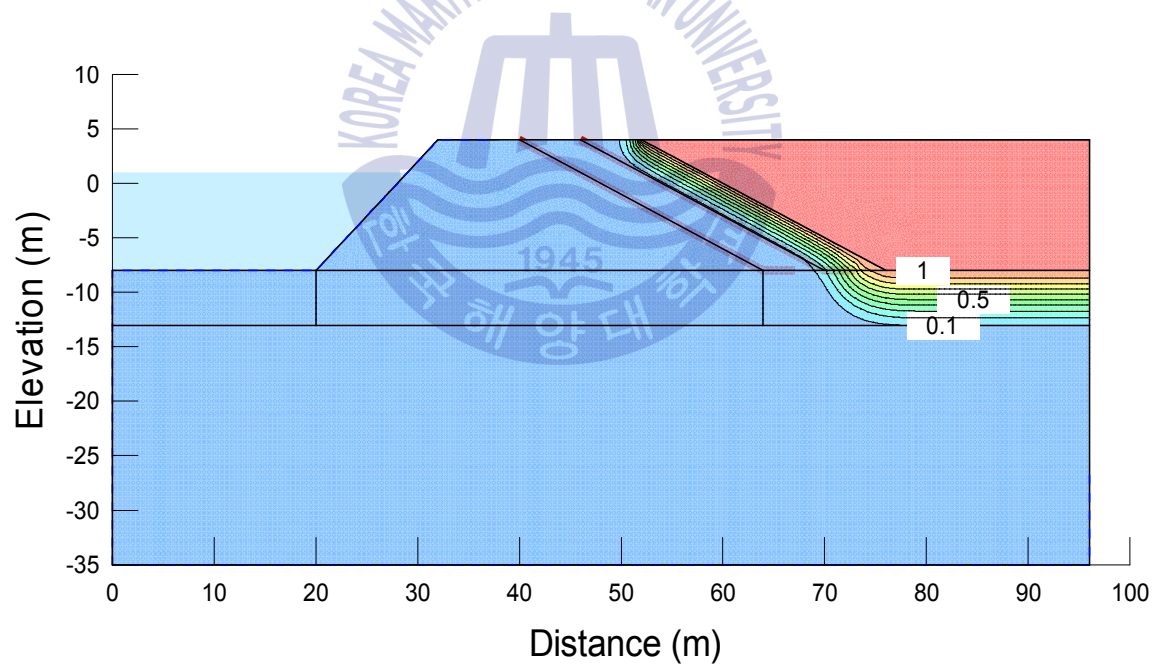


(d) Extended length of 6.0m

Figure 5.18 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative four extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ in rubble mound type quay wall (continued)

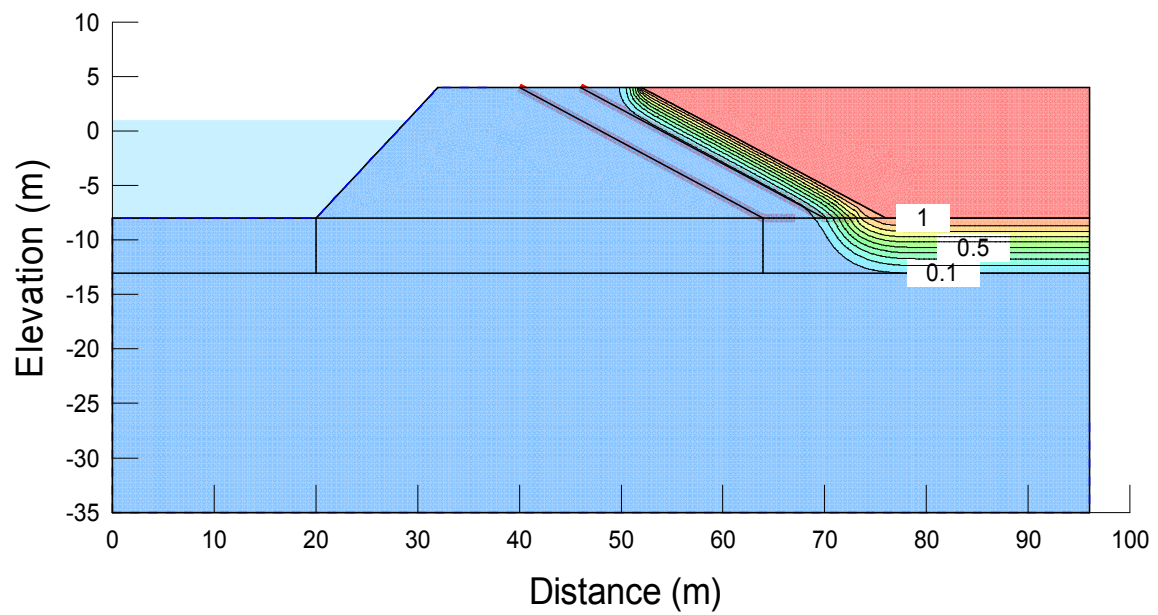


(a) Extended length of 1.0m

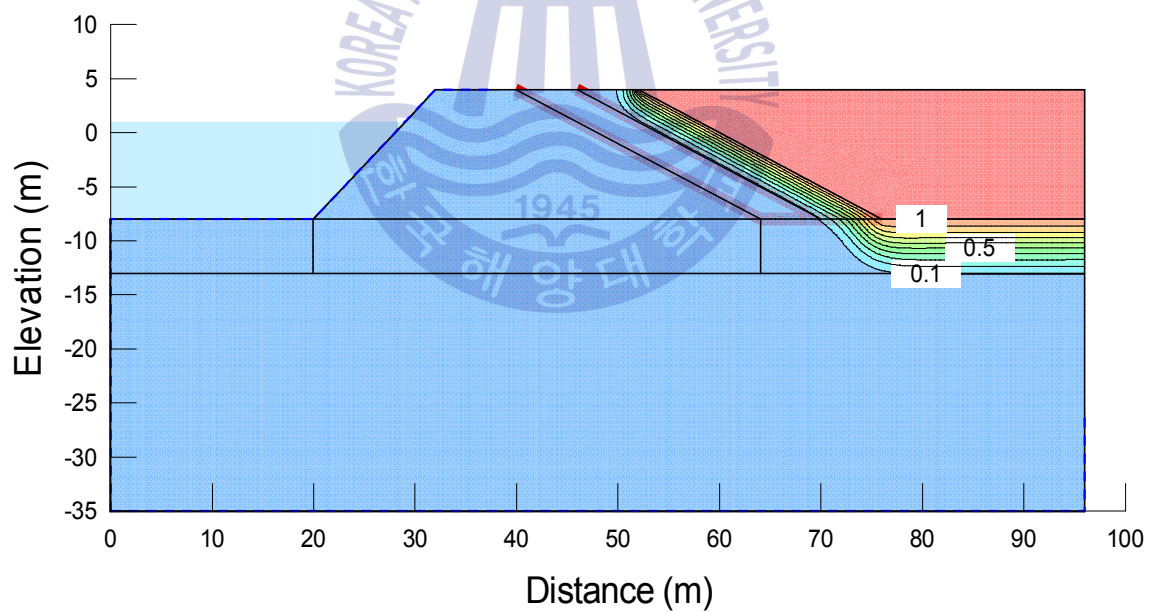


(b) Extended length of 3.0m

Figure 5.19 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative four extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ in rubble mound type quay wall



(c) Extended length of 5.0m



(d) Extended length of 6.0m

Figure 5.19 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with representative four extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ in rubble mound type quay wall (continued)

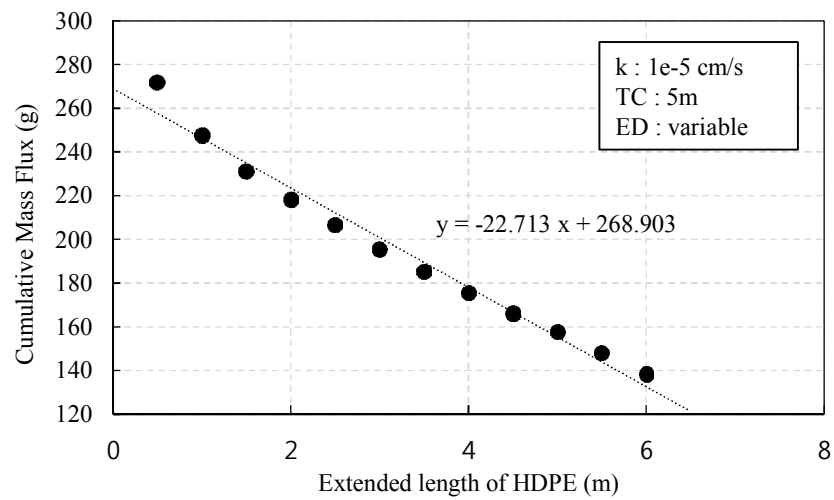


Figure 5.20 Cumulative mass flux during 50 years with different extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$



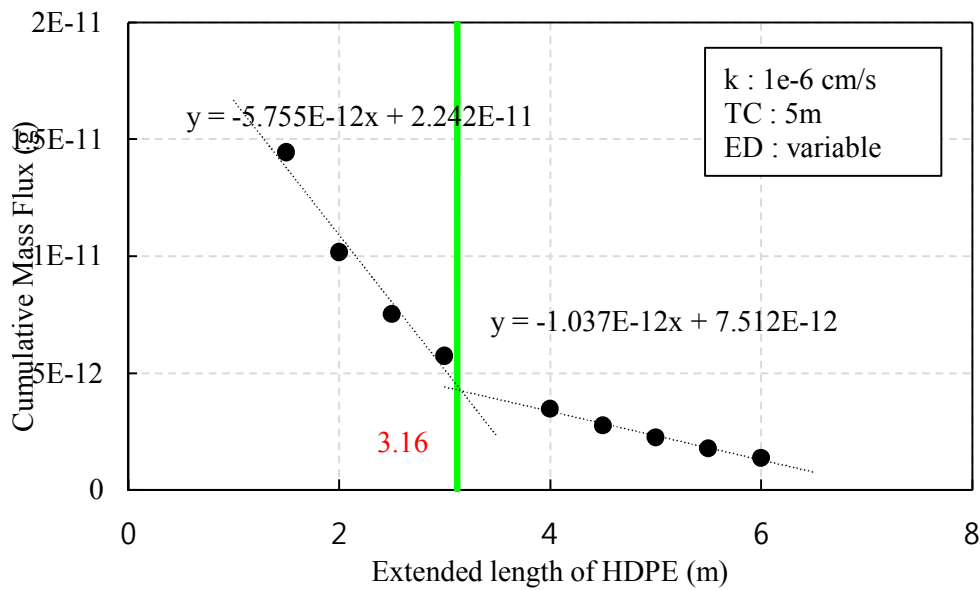


Figure 5.21 Cumulative mass flux during 50 years with different extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$

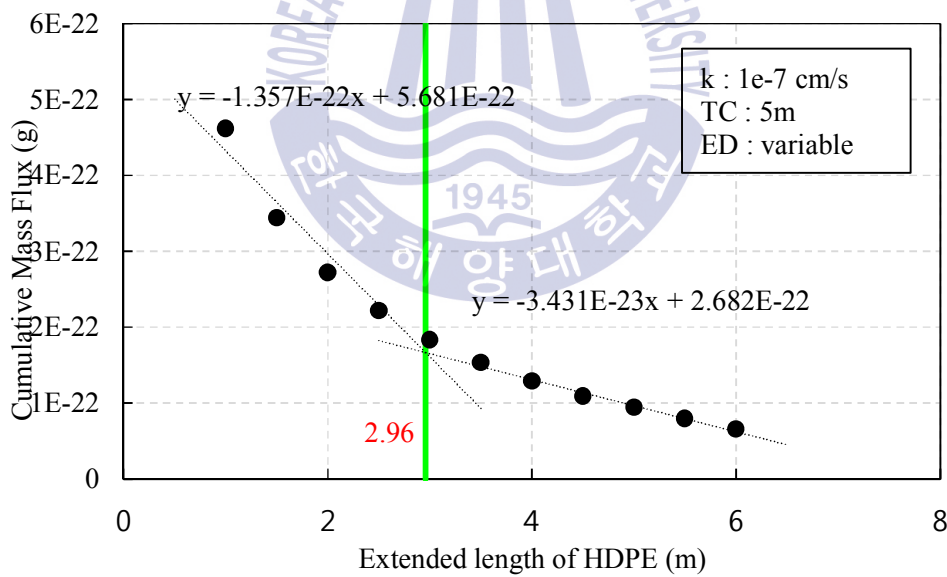


Figure 5.22 Cumulative mass flux during 50 years with different extended length of HDPE liner with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$

5.2.2 중간보호층 투수계수 변화에 따른 오염물 분산영향

경사제식 호안은 2중 차수시트 구조를 측면 차수에 적용하고 차수기반과 일체시킨 것인데, 차수시트에 손상이 생겼을 경우 2중 시트 간의 중간보호층의 효과를 알기 위하여 Table 3.8에 나타낸 것처럼 바닥 차수시스템의 두께를 500cm, 투수계수를 1×10^{-6} cm/s로 고정하고, 중간보호층의 투수계수는 1×10^{-2} , 1×10^{-4} , 1×10^{-5} cm/s로 가정하여 각각의 경우에 대한 차수시트의 환산투수계수는 ‘관리형 폐기물 매립호안 설계·시공·관리 매뉴얼(Kwon et al., 2012)’을 참고하여 중간보호층의 효과를 평가하였다.

Fig. 5.23은 중간보호층의 각 투수계수에 따른 50년 경과 후의 누적누출량을 나타내며, Fig. 5.24는 오염물 농도 분포를 나타낸다. 중간보호층의 투수계수 1×10^{-2} cm/s일 경우에는 누적누출량이 1.53g으로 해석되었으나, 1×10^{-4} , 1×10^{-5} cm/s일 경우를 보면 3.5×10^{-9} g ~ 1.1×10^{-9} g으로 유출이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

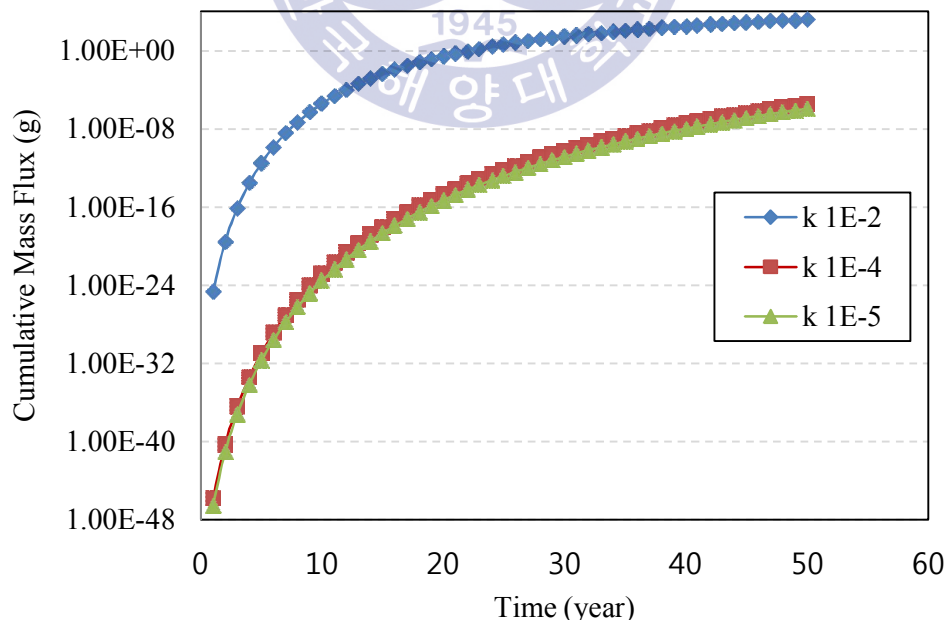
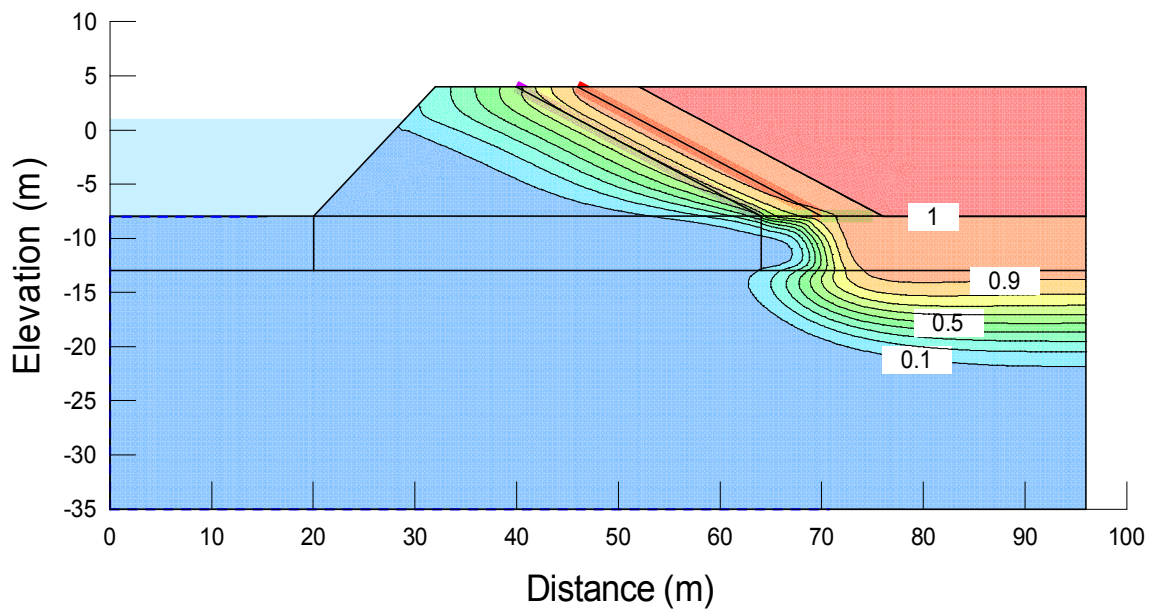
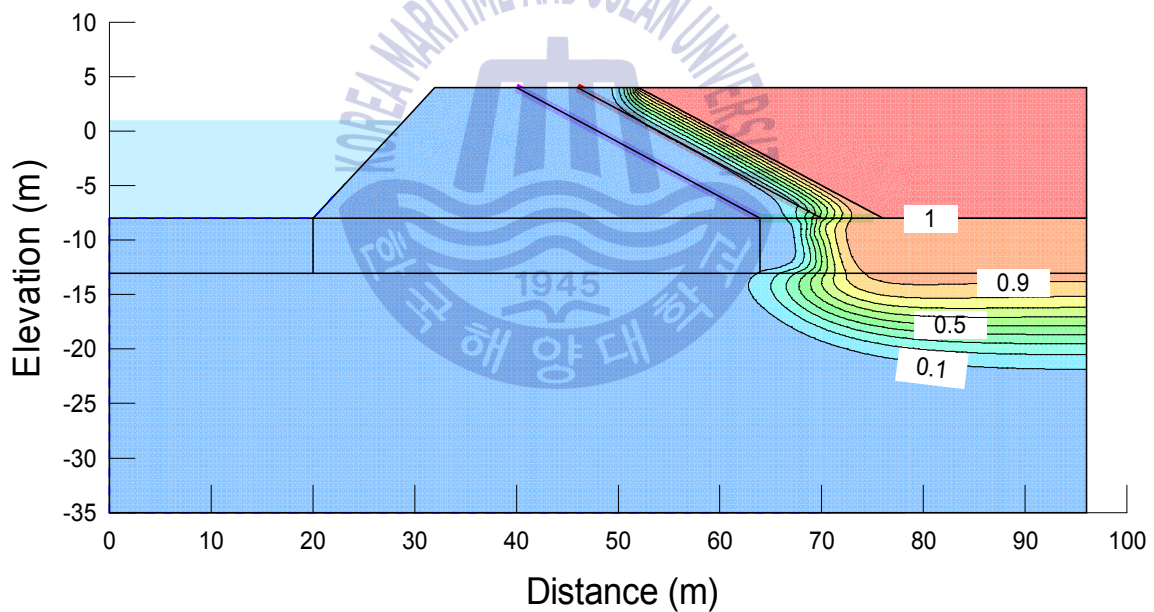


Figure 5.23 Time history plots of cumulative mass flux during 50 years with different equivalent hydraulic conductivity of damaged HDPE liner

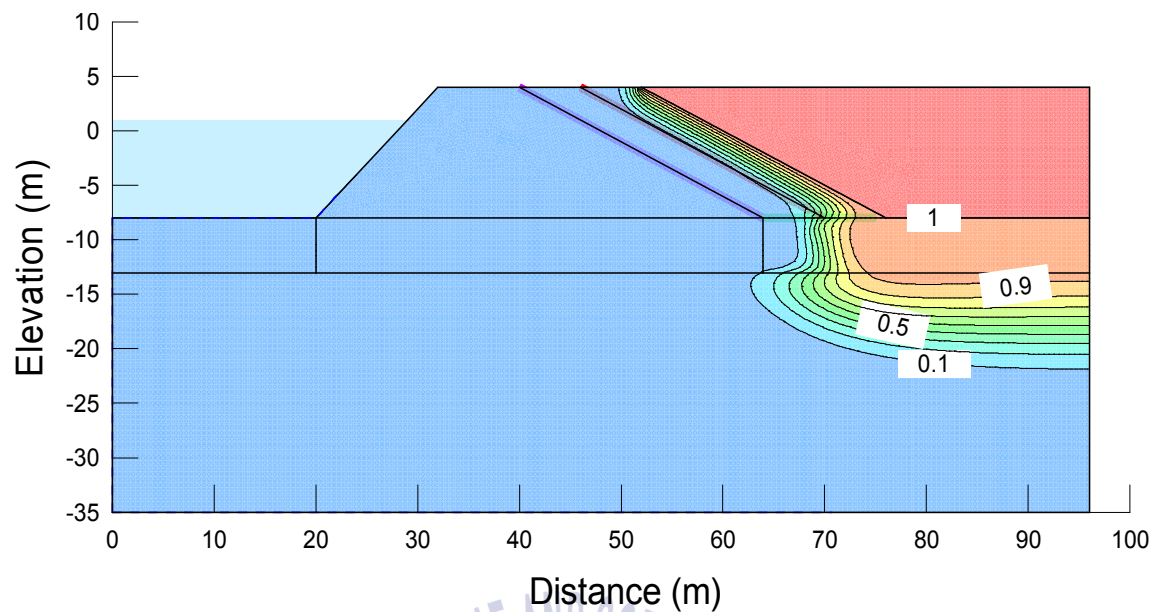


(a) Case 1 (protection layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$)



(b) Case 2 (protection layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$)

Figure 5.24 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with three different hydraulic conductivity of protection layer in the case of damaged HDPE liner in rubble mound type quay wall



(c) Case 3 (protection layer with hydraulic conductivity of $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$)

Figure 5.24 Predicted concentration contour plots after 50 yrs. with three different hydraulic conductivity of protection layer in the case of damaged HDPE liner in rubble mound type quay wall (continued)

5.2.3 소결

해상 폐기물매립장의 경사제식 호안의 차수시트 설치범위를 도출하기 위하여 앞장에서 산정한 바닥 차수시스템의 두께를 500cm, 차수시트의 투수계수를 1×10^{-11} cm/s로 고정하고, 바닥 차수시스템의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 차수시트 설치길이 6.0m를 0.5m간격으로 구분하여 12가지 경우에 대한 50년 경과 후 누적누출량을 비교한 결과 최적의 투수계수 최소기준 1×10^{-6} cm/s에 대한 최적의 연장길이는 3.16m로 나타났다. 투수계수 1×10^{-5} cm/s에서는 차수시트가 길어짐에 따라 그 비율만큼 유출량이 줄어드는 것으로 나타나고 있어 최적 차수시트 길이를 판단하기 어려웠다. 측면 차수시스템의 차수 처리의 시공 상의 불확실성을 고려하여 약 30%의 여유를 두어 차수시트의 최적의 설치길이에 대한 최소기준을 5.0m로 산정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

경사제식 호안의 차수시트에 손상이 생겼을 경우 2중 시트 간의 중간보호층의 효과를 알기 위하여 바닥 차수시스템의 두께를 500cm, 투수계수를 1×10^{-6} cm/s로 고정하고, 중간보호층의 투수계수는 1×10^{-2} , 1×10^{-4} , 1×10^{-5} cm/s로 가정하여 각각의 경우에 대한 차수시트의 환산투수계수를 적용하여 중간보호층의 효과를 평가하였다. 그 결과 1×10^{-4} cm/s인 경우를 기준으로 1×10^{-4} cm/s 및 1×10^{-5} cm/s일 때 거의 100% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 5.21의 오염물 농도 분포에서도 1×10^{-4} cm/s 및 1×10^{-5} cm/s에서 오염물 이동이 최소화 된 것을 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터 차수시트에 어떤 손상이 생긴 경우라도 중간보호층의 재료에 투수계수가 작은 재료를 이용하면 침투·이류 분산 정도가 적은 것을 알 수 있다.

제 6 장 조위변동 및 내수위 관리에 따른 차수시스템의 차수성능 평가

6.1 조위변동의 영향

6.1.1 개요

앞 장에서는 정상류 조건 하에서의 차수시스템의 차수성능을 평가하였다. 하지만 해상 폐기물매립장의 특성상 해역의 조석의 영향에 따른 조위변동을 고려한 비정상류 하에서의 차수성능을 검토할 필요가 있다.

해상 폐기물매립장의 정상류 조건에서와 수위 변동을 고려한 비정상류 조건의 침투 이류·분산(확산)의 차이를 비교하기 위한 오염물 이동 및 침출수 거동의 분석은 상당히 장기간의 해석이 필요시 된다. 그러나 비정상류 해석을 장기간에 걸쳐 계산하는 것은 상당한 계산성능과 계산비용이 요구되므로 본 절에서는 1년 동안의 해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

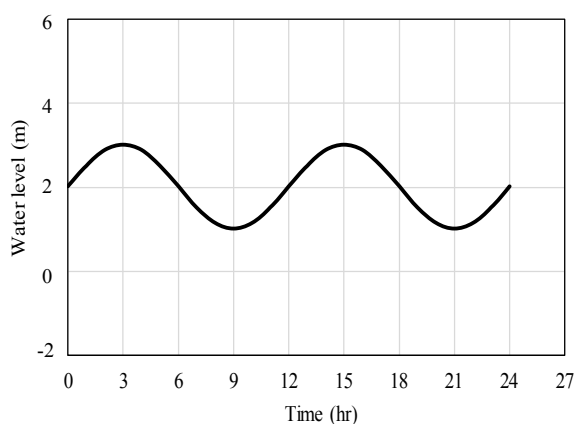
먼저 조위변동에 대한 정보를 확인하기 위해 앞서 우리나라의 해상 폐기물매립장의 건설입지 분석 사례에서는 수도권 폐기물을 처리하기에 서해안의 장봉도와 무의도 전면이 가장 적합한 지역으로 분석하고 있다(Oh et al., 2012). 그러므로 국립해양조사원을 통해 서해안은 상기 분석사례를 참고하여 장봉도와 무의도의 조위를 조사하였고, 남해안과 동해안은 임의 선정하여 경남 통영의 소매물도, 동해항의 조위를 조사하여 Table 6.1에 나타내었다. 바다와 접한 3면의 대표지역에 대한 조위차는 서해 9.0m내외, 남해 2.6m내외, 동해 0.4m내외로 지역별로 편차가 매우 크게 나타났다. 그러므로 본 연구에서 조석에 의한 해역의 수위 변동은 2.0m, 8.0m 두가지 경우에 대해 해석하였다.

Table 6.1 Representative tidal level at the western, southern and eastern coast of Korea

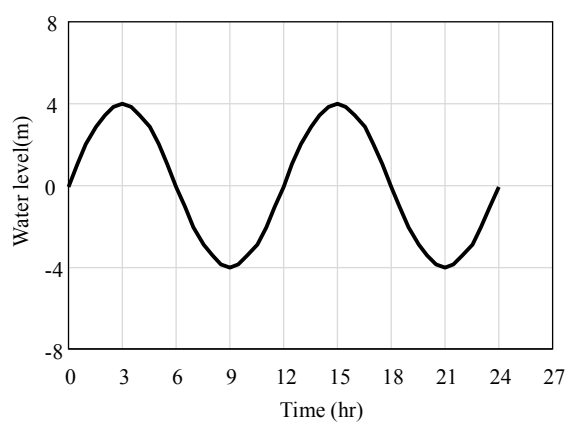
Location		Tidal level (m)		
		Approx.H.H.W	M.S.L	Tide
Western	장봉항	9.104	4.552	9.104
	소무의도	8.964	4.482	8.964
Southern	소매물도	2.548	1.274	2.548
Eastern	동해항	0.342	0.171	0.342

수위 변동을 고려한 비정상류 해석의 수위 경계조건과 계산 간격 및 계산 기간은 아래와 같고, 정상류 해석의 경우 단위 계산간격을 3시간으로 하였다. 해석 모델 및 나머지 해석 조건은 앞 장과 동일하다.

- 1) 조석에 의한 해역의 수위 변동은 평균수위 2m, 8m에 파고 1m, 4m인 sin 파로 가정하고(Fig. 6.1), 폐기물매립장 내부는 관리 수위로 평균수위와 동일한 것으로 한다.
- 2) 단위 계산간격은 초기 5일은 1시간 간격으로 하고, 이후에는 3시간 간격으로 360일 동안 해석하여 총 1년 동안의 해석을 수행한다.



(a) Tide 2m



(b) Tide 8m

Figure 6.1 Hypothetical sinusoidal tide level with two tidal range of 2m and 8m

6.1.2 2중 연직벽체 호안

Figs. 6.2 ~ 6.3은 정상류 조건 하에서의 전수두 분포 및 지반내 간극수의 유속 벡터를 나타낸다. 조위차 2m에 대응하는 정상류 해석의 경우 폐기물매립장 내부 관리수위가 해역의 수위 보다 1m 높게 유지되므로 전수두 분포의 등수두 선이 폐기물 층이 2m로 높고 바닥 차수시스템을 통과하며 감소하며 해역에서의 해저지반에서 1m의 전수두 분포를 나타낸다. 그에 따라 간극수의 흐름은 전수두가 높은 내부에서 외부로의 흐름이 발생한다. 특히 불투수성 바닥 차수시스템을 통한 흐름은 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

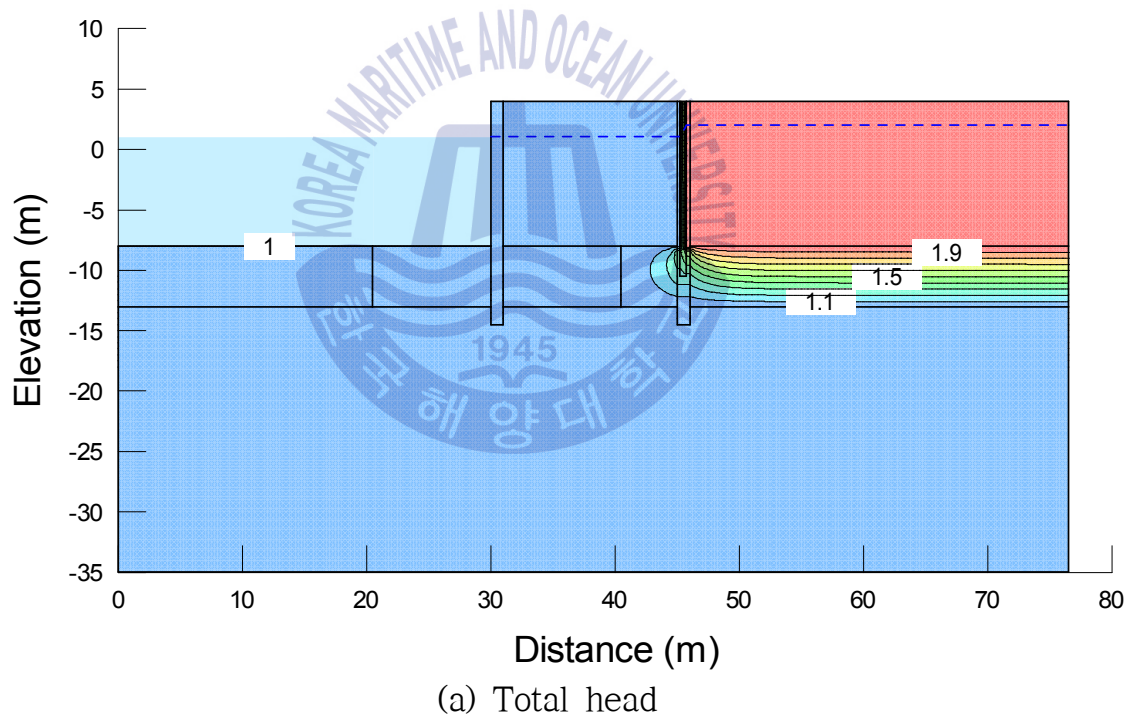
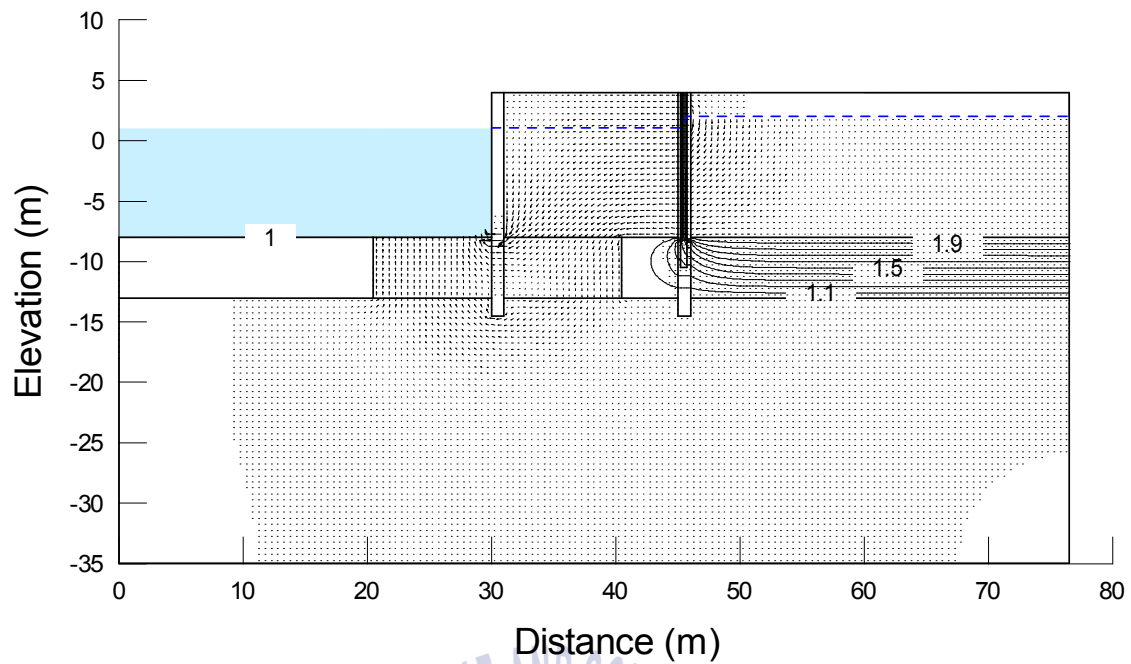


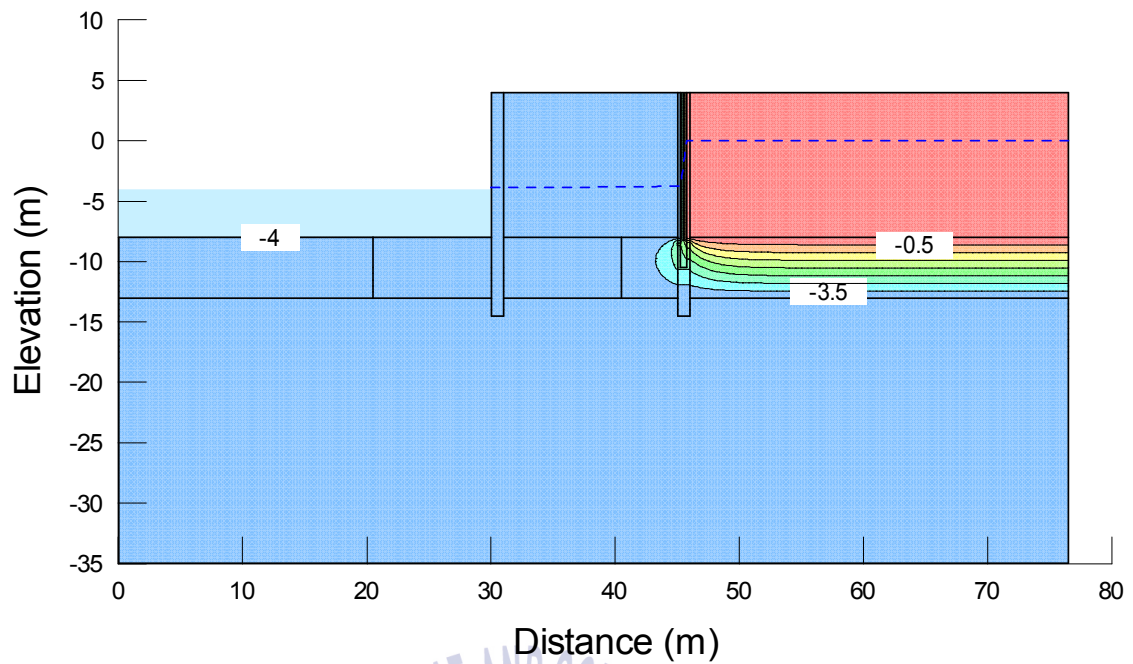
Figure 6.2 Total head and flow vector under steady flow in double sheet pile quay wall where water level of land side is 1m higher than sea side



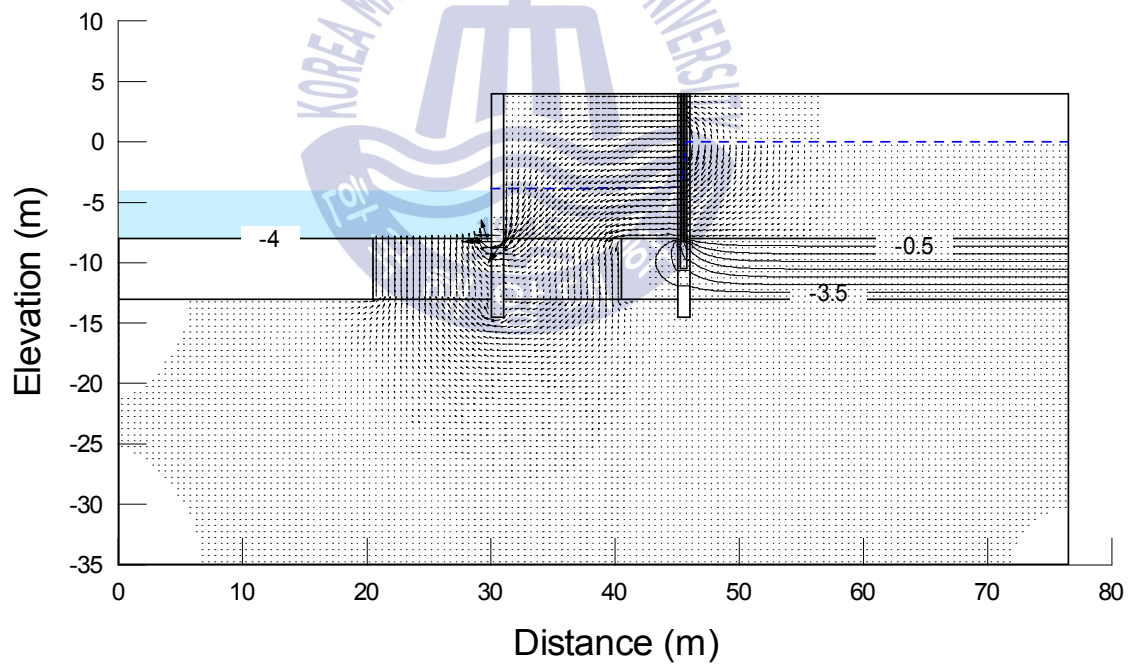
(b) Flow vector

Figure 6.2 Total head and flow vector under steady flow in double sheet pile quay wall where water level of land side is 1m higher than sea side (continued)

조위차 8m에 대응하는 정상류 해석의 경우의 경우 폐기물매립장 내부 관리 수위가 해역의 수위 보다 4m 높게 유지되므로 전수두 분포의 등수두선이 폐기물 층에서 바닥 차수시스템을 통과하며 감소하며 해역에서의 해저지반에서 -4m의 전수두 분포를 나타낸다. 그에 따라 간극수의 흐름은 전수두가 높은 내부에서 외부로의 흐름이 발생한다. 특히 조위차가 클에 따라 2중 연직벽체 전면을 따라 흐름이 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 6.3).



(a) Total head



(b) Flow vector

Figure 6.3 Total head and flow vector under steady flow in double sheet pile quay wall where water level of land side is 4m higher than sea side

Figs. 6.4 ~ 6.7에서는 각각 조석에 따른 수위변동을 고려한 비정상류 조건 하에서의 전수두 분포 및 간극수의 유속벡터를 나타낸다. 수위 변동에 따라 지반내 간극수 흐름이 시간에 따라 크기 및 방향이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 특히 해역의 수위가 폐기물매립장의 관리수위보다 높은 경우 해역에서 폐기물매립장 내부로의 간극수 흐름이 발생하는 것으로 나타났으며 조위차가 클수록 더욱 크게 발생하는 것으로 나타났다.

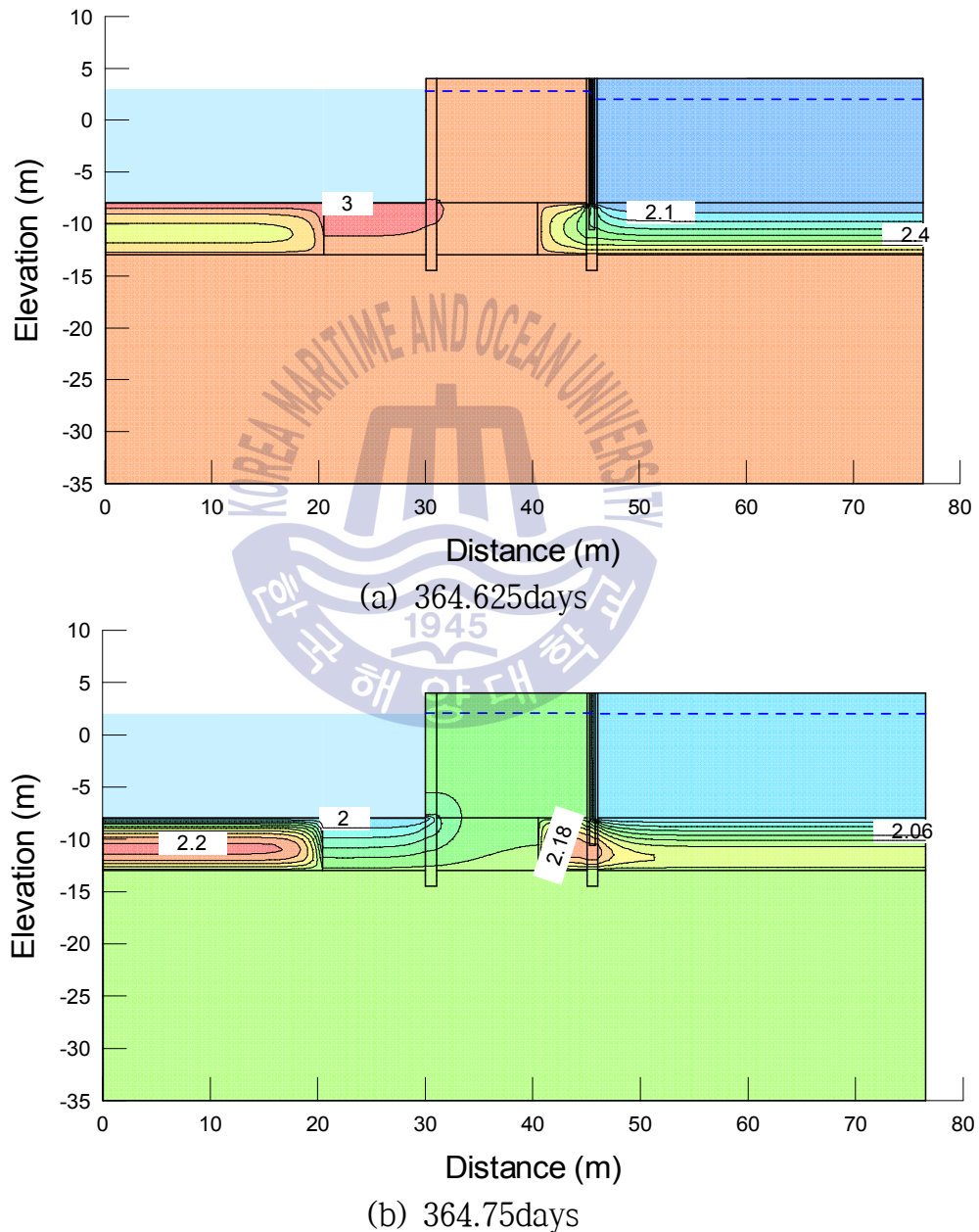
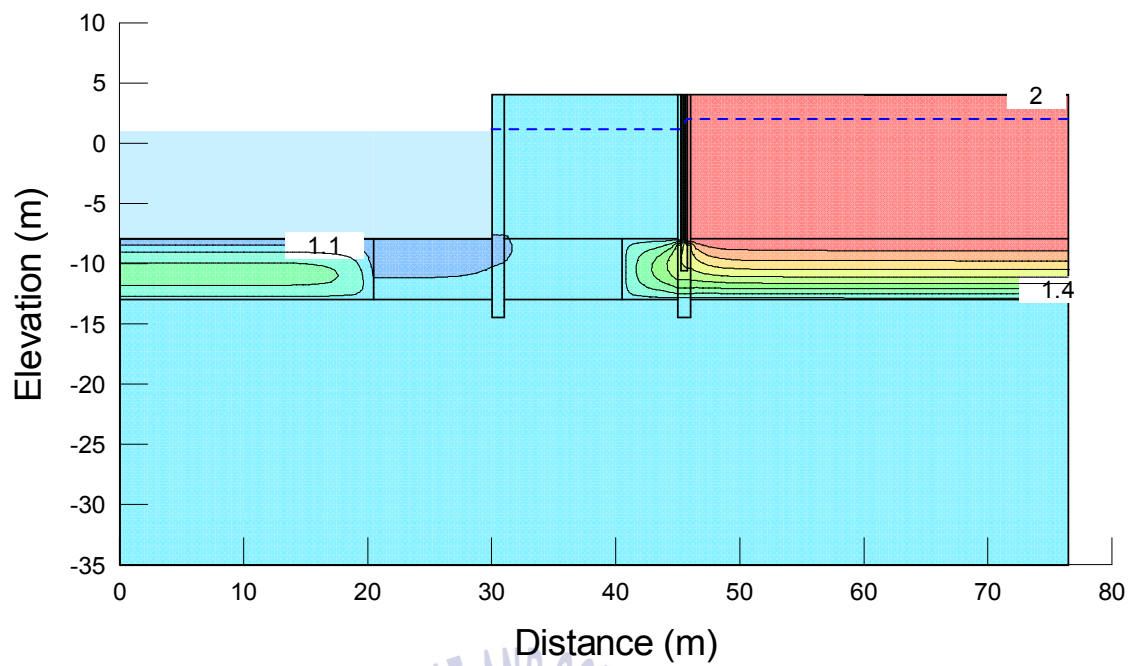
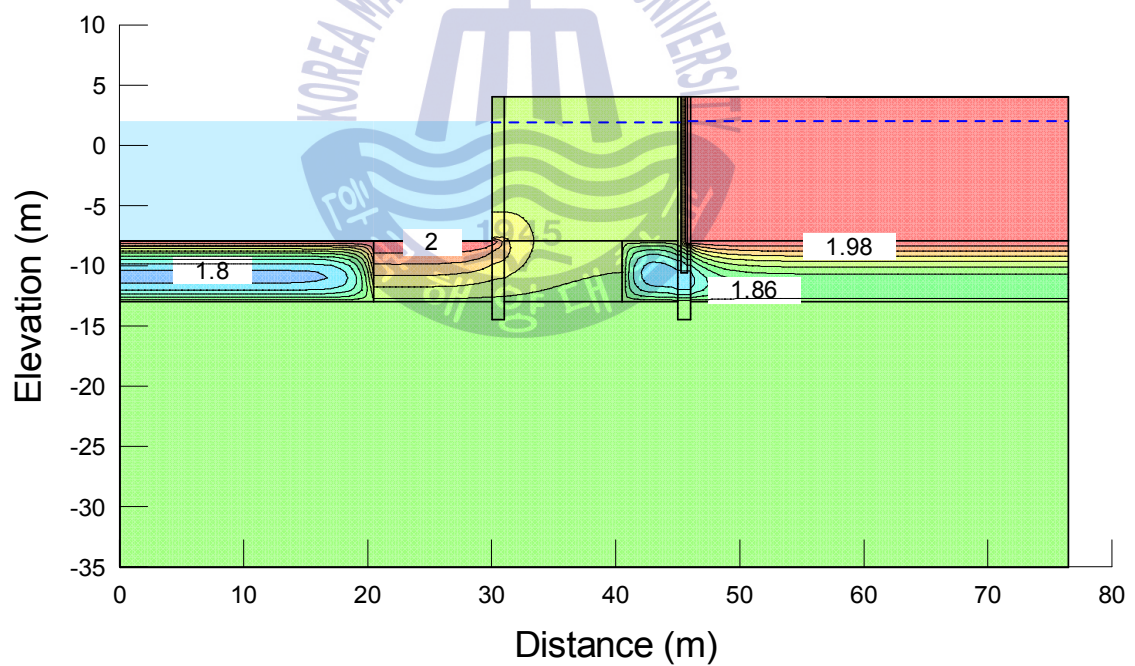


Figure 6.4 Predicted plots of total head at the last four specific times under transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 2m)

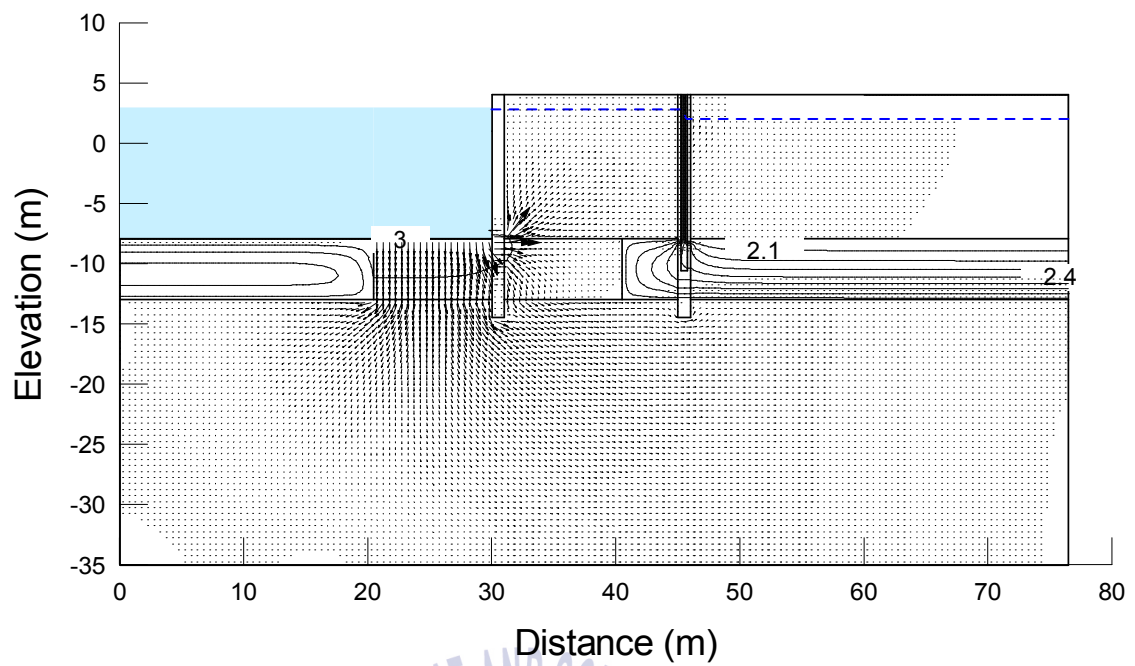


(c) 364.875days

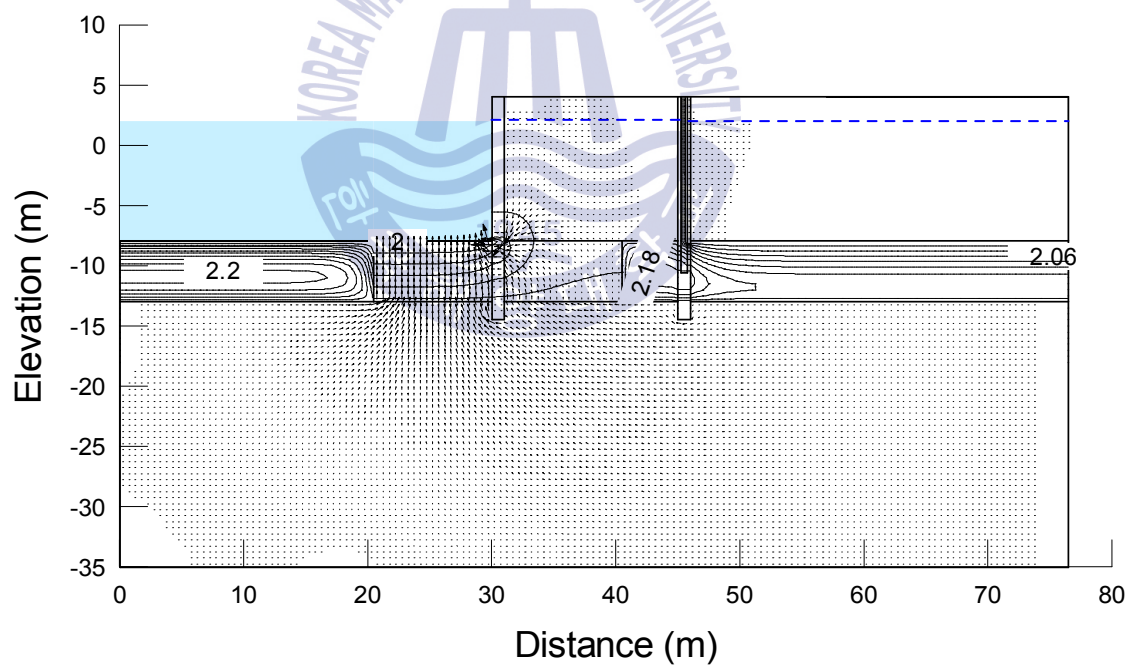


(d) 365.0days

Figure 6.4 Predicted plots of total head at the last four specific times under transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 2m) (continued)

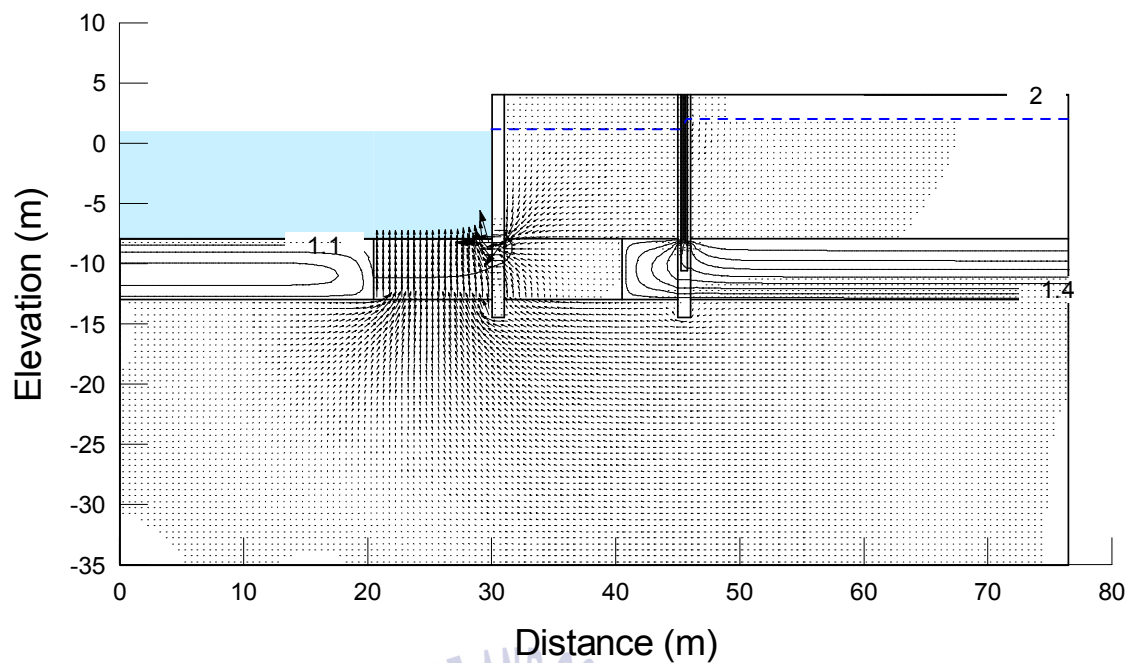


(a) 364.625days

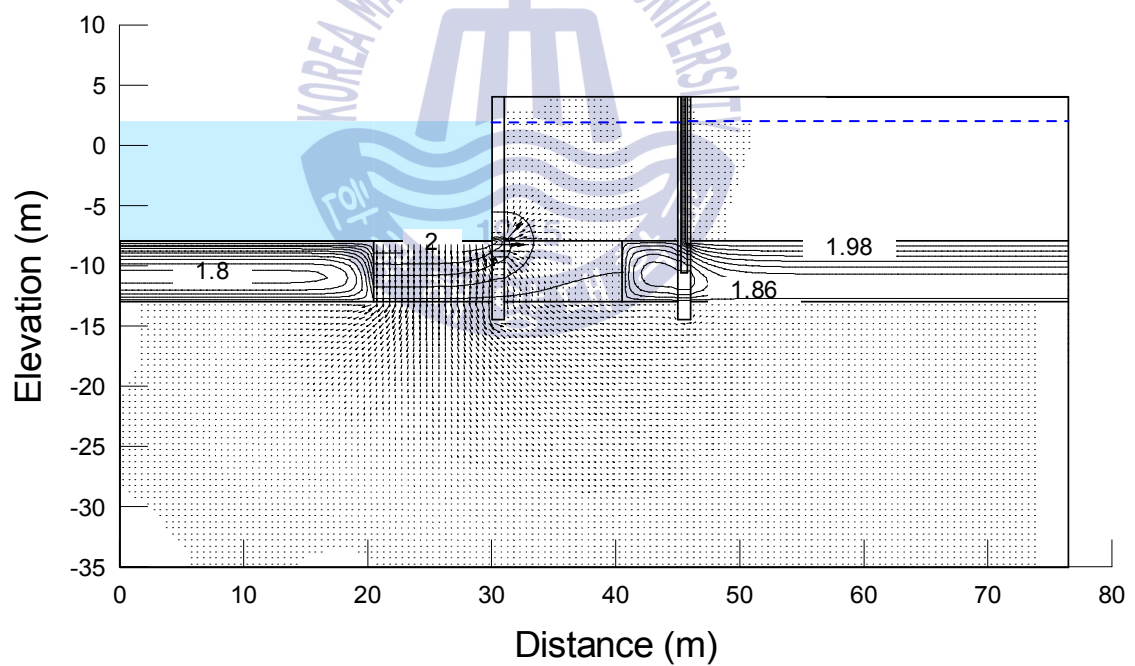


(b) 364.75days

Figure 6.5 Predicted plots of flow vectors at the last four specific times under transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 2m)



(c) 364.875days



(d) 365.0days

Figure 6.5 Predicted plots of flow vectors at the last four specific times under transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 2m) (continued)

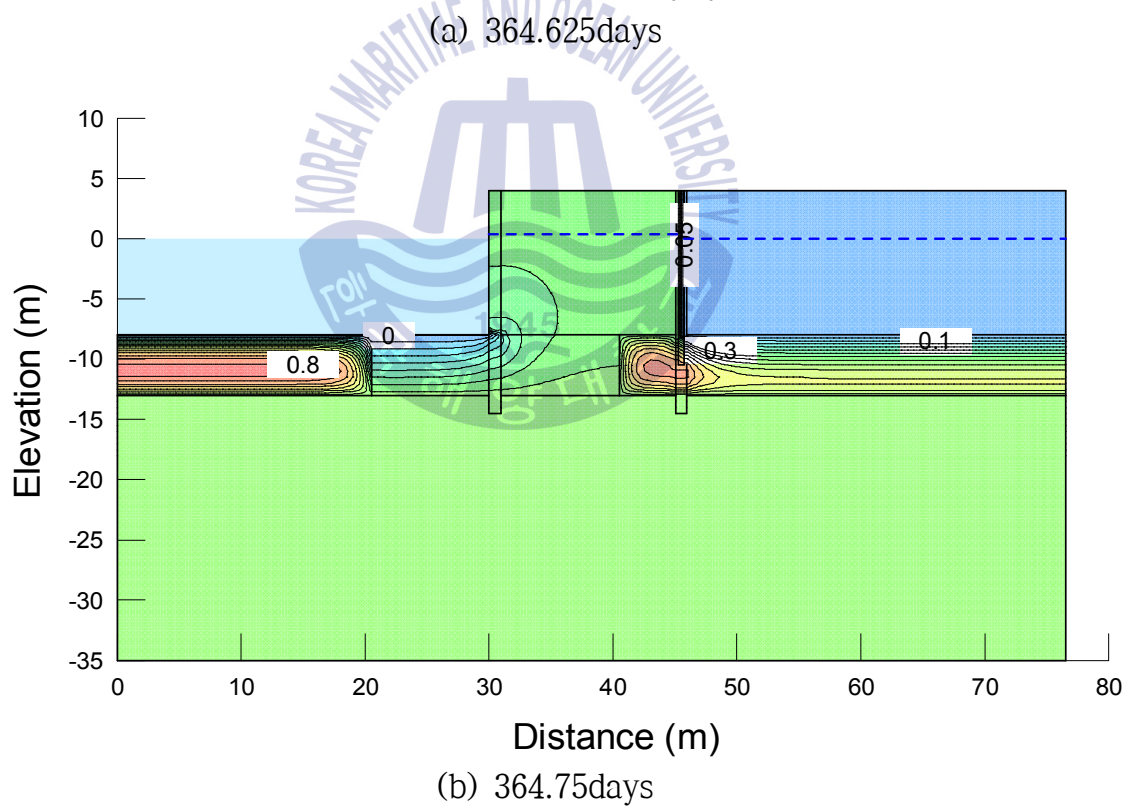
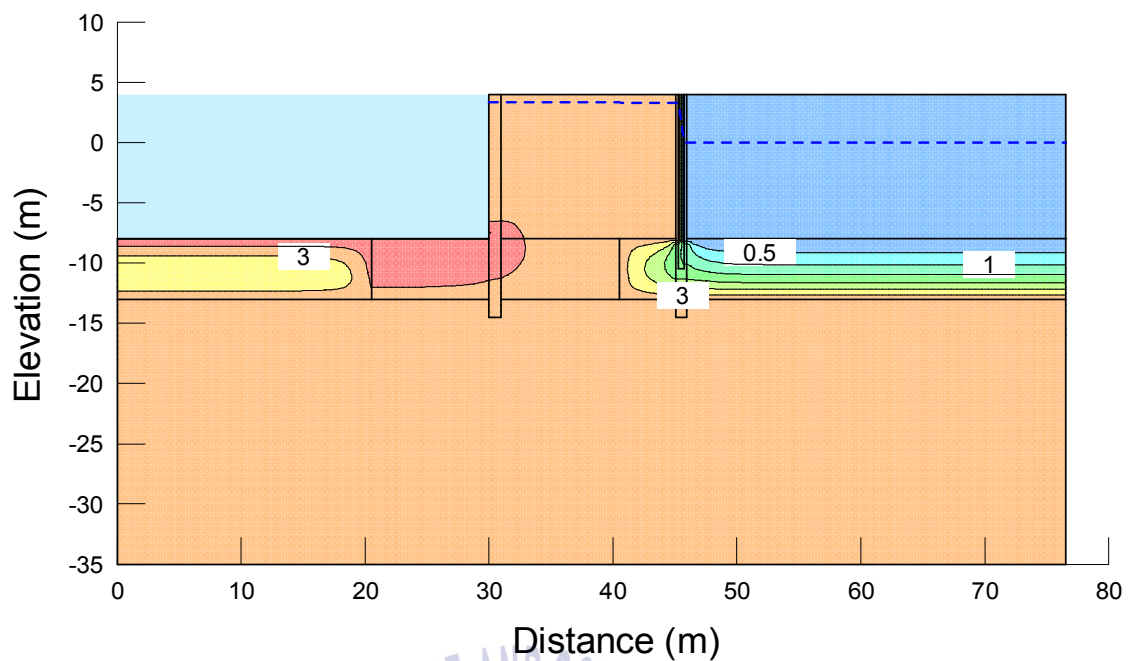
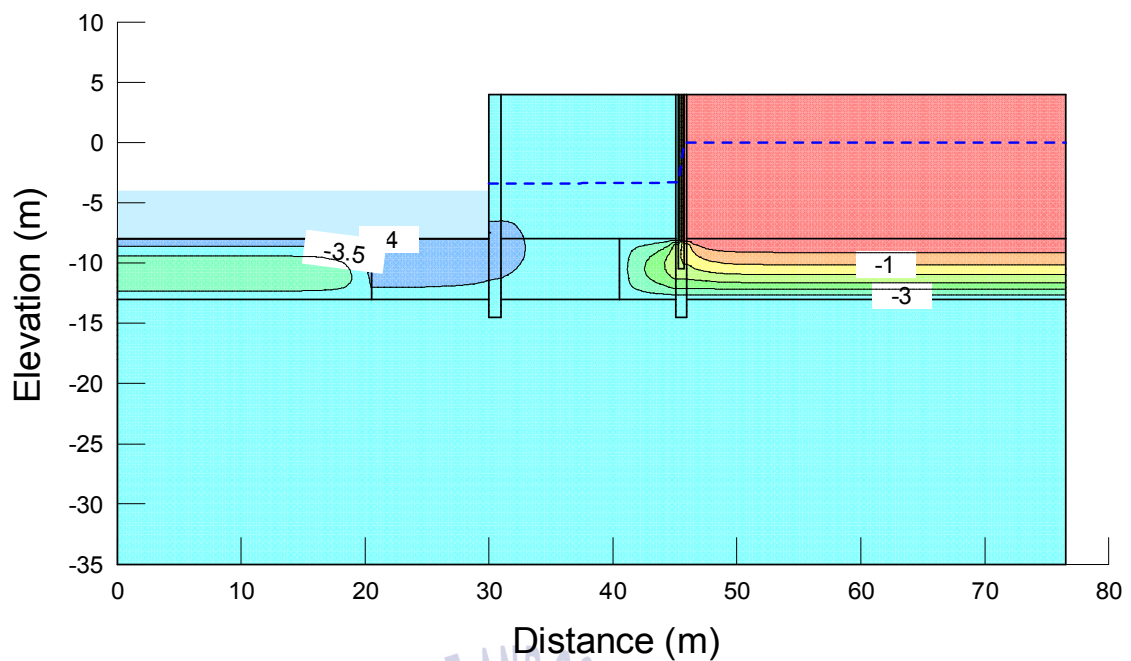
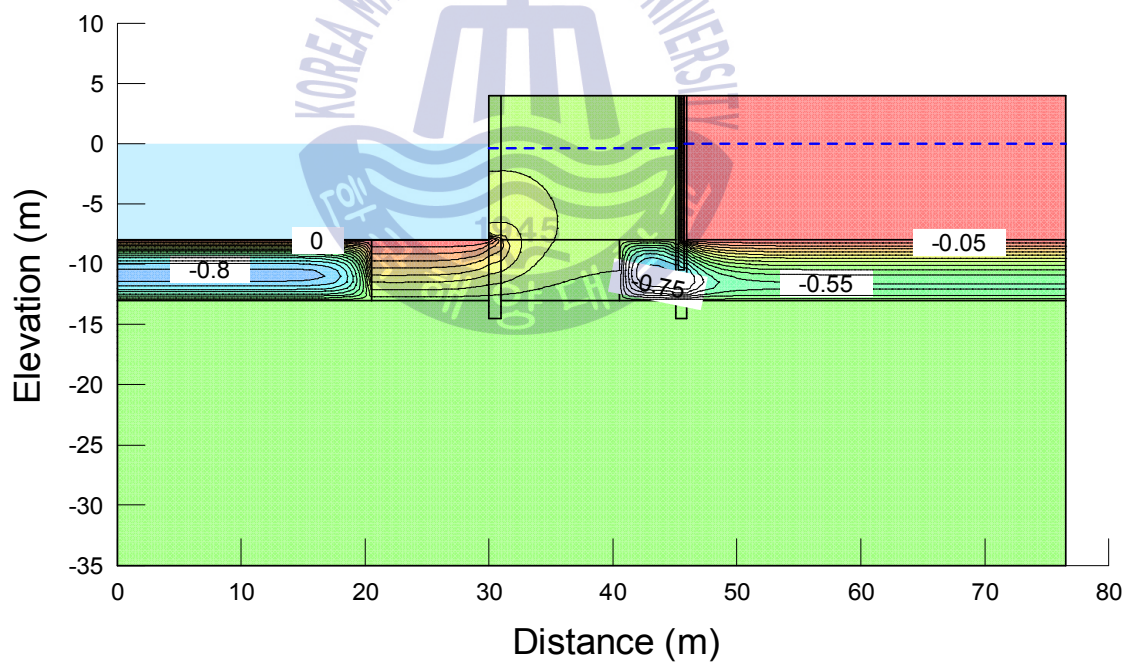


Figure 6.6 Predicted plots of total head at the last four specific times under transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 8m)

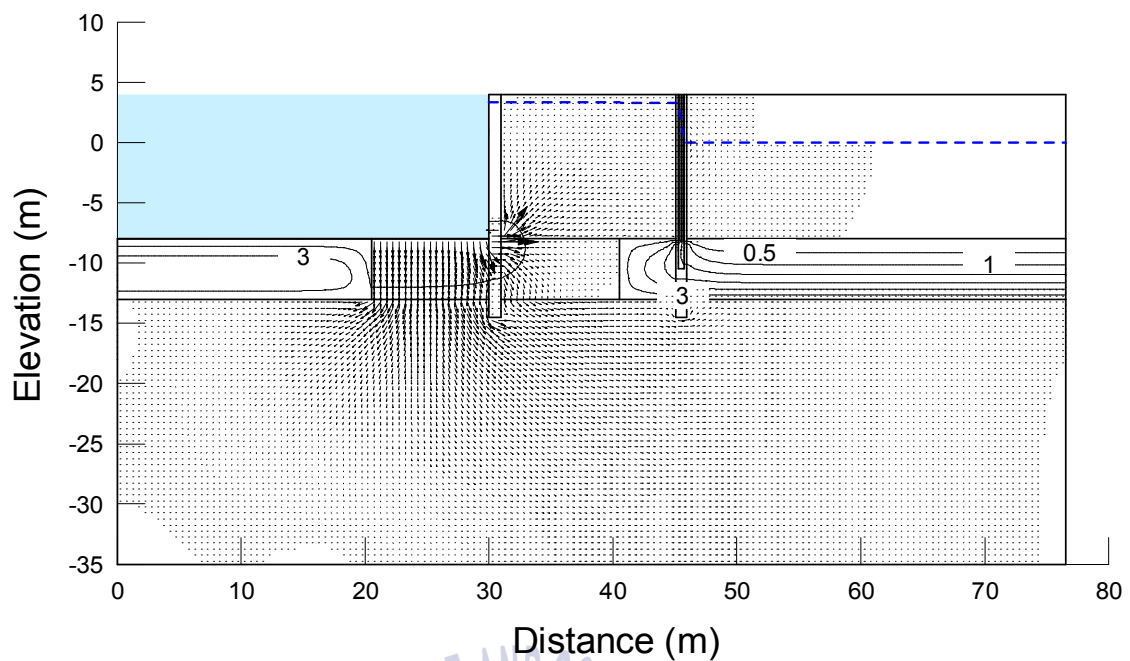


(c) 364.875days

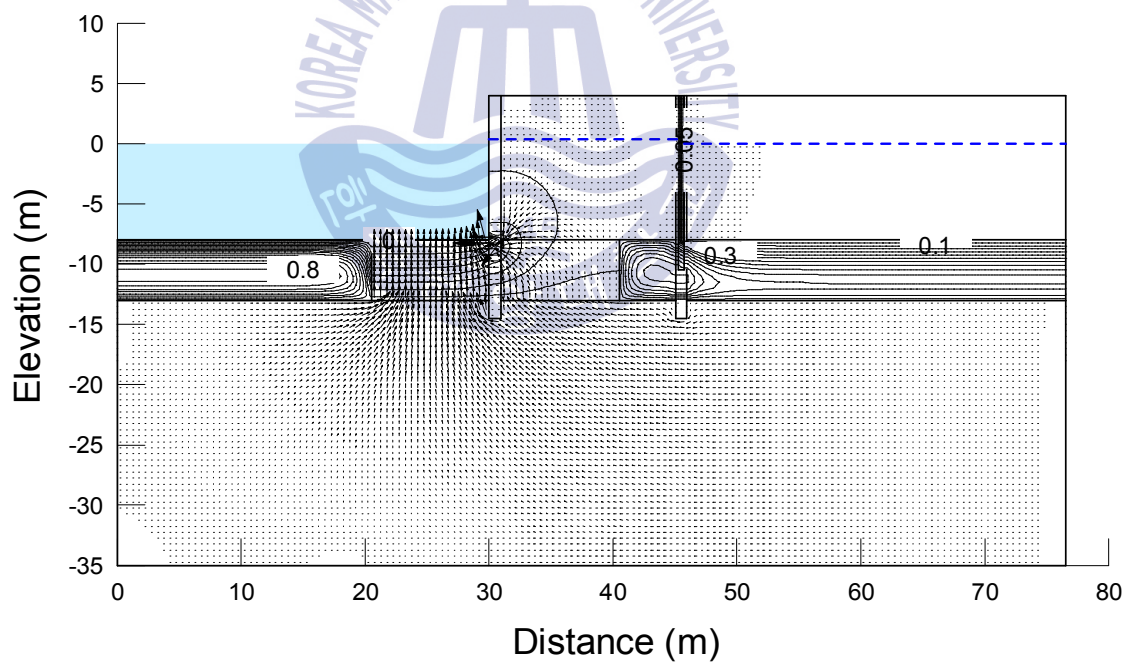


(d) 365.0days

Figure 6.6 Predicted plots of total head at the last four specific times transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 8m) (continued)

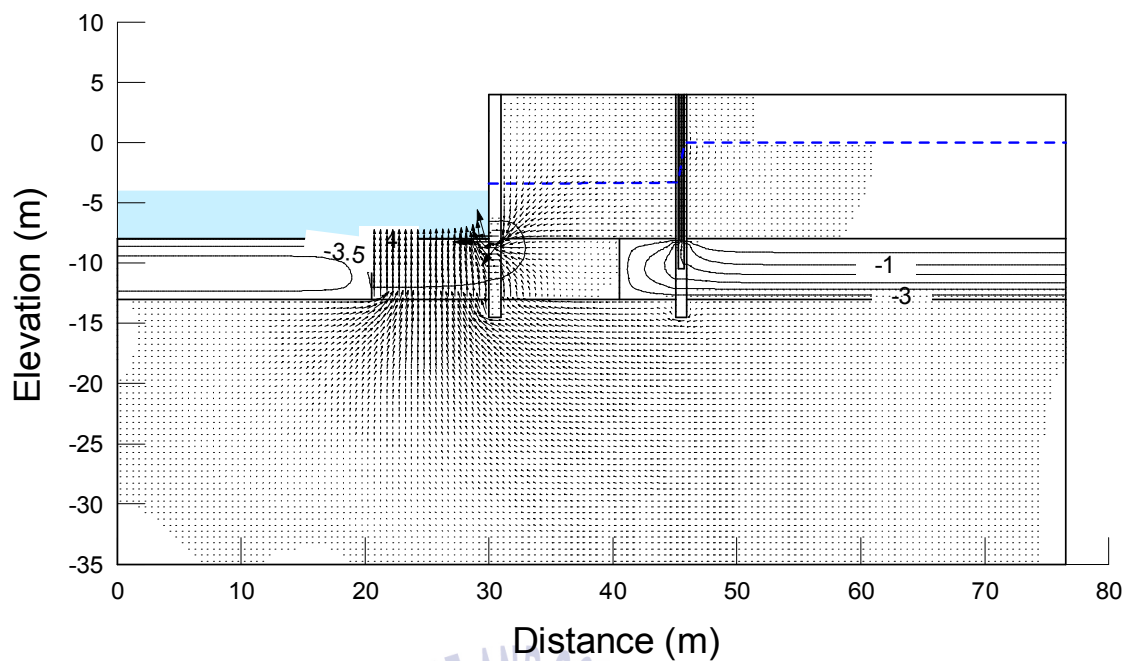


(a) 364.625days

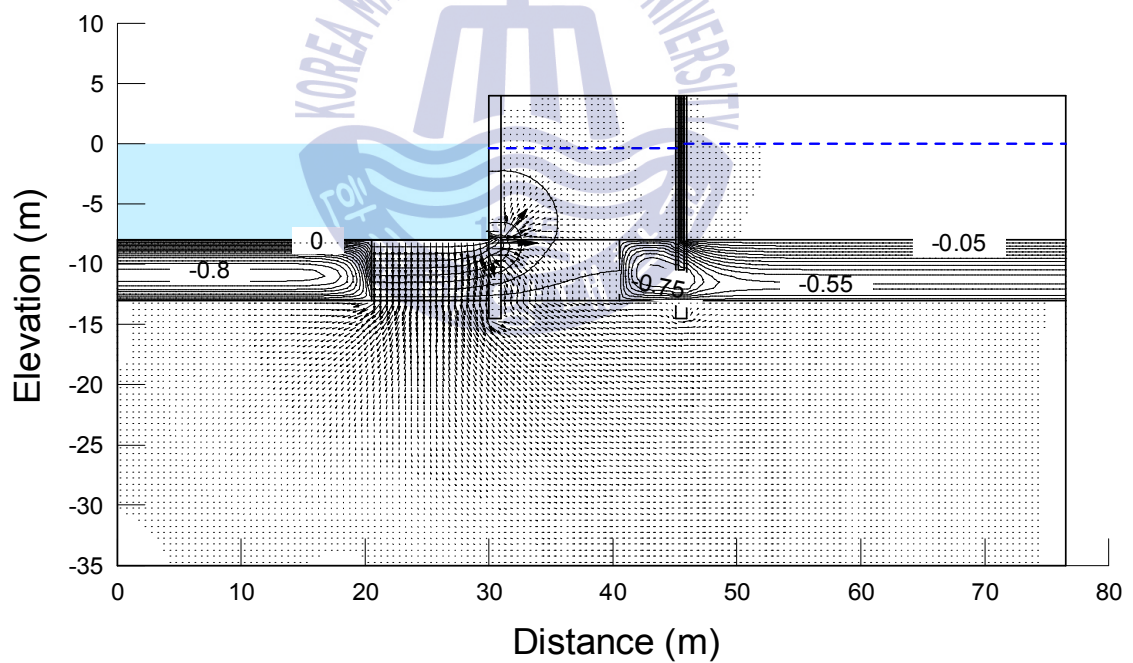


(b) 364.75days

Figure 6.7 Predicted plots of flow vectors at the last four specific times transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 8m)



(c) 364.875days



(d) 365.0days

Figure 6.7 Predicted plots of flow vectors at the last four specific times transient flow in double sheet pile type quay wall (case of maximal tidal range of 8m) (continued)

Fig. 6.8은 측면 차수시스템에서 폐기물 지층의 방향으로 약 1m 떨어진 바닥 차수시스템 상부 표면 부근에서의 시간에 따른 오염물 농도 변화를 나타내기 위한 각 노드의 위치를 나타낸다. 각 노드 A, B, C, D는 상부에서 하부로 순서대로 상부가 A 하부가 D를 나타낸다.

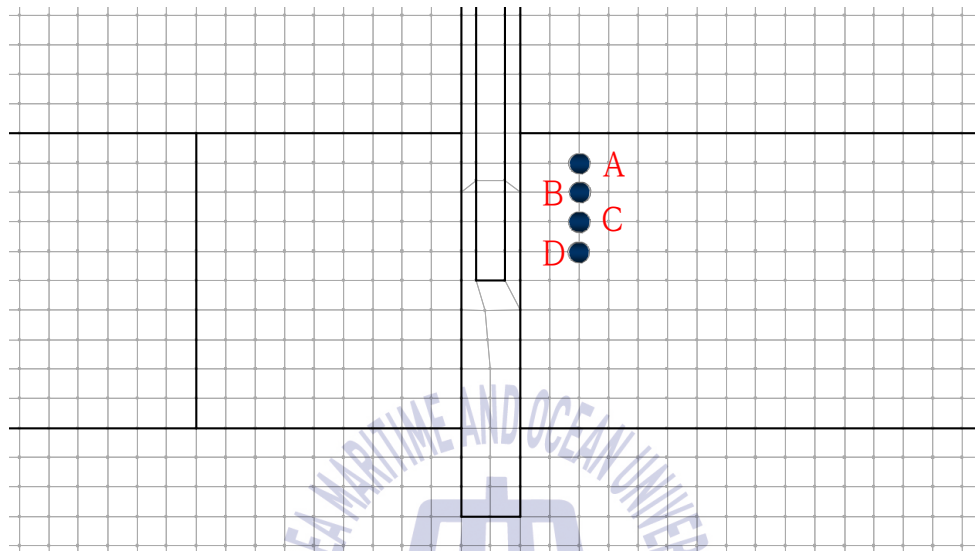


Figure 6.8 Four monitoring nodes to present time history graph of contaminant concentration

Figs. 6.9와 6.10은 조위차 2m일 경우의 각각 정상류 조건 하와 수위 변동을 고려한 비정상류 조건 하에서의 각 노드별 시간에 따른 오염물 농도 변화를 나타낸다. 그림에서처럼 수위 변동을 고려한 비정상류 조건보다 정상류 조건 하에서 오염물의 농도가 증가하는 것으로 나타났다.

Figs. 6.11과 6.12는 조위차 8m일 경우의 각각 정상류 조건 하와 수위 변동을 고려한 비정상류 조건 하에서의 각 노드별 시간에 따른 오염물 농도 변화를 나타낸다. 조위차 8m일 경우에도 2m와 동일하게 비정상류 조건보다 정상류 조건 하에서 오염물의 농도가 증가하는 것으로 나타났다.

그리고 조위차 2m일 경우와 8m일 경우를 비교하면 조위차가 작을수록 정상류조건에서의 오염물의 농도가 증가됨을 알 수 있다.

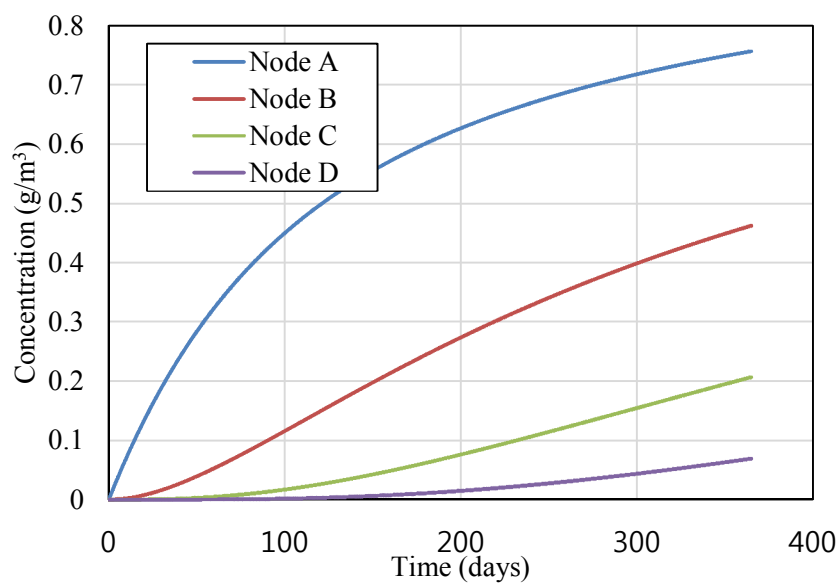


Figure 6.9 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under steady flow considering water level difference of 2m between sea and landfill sides

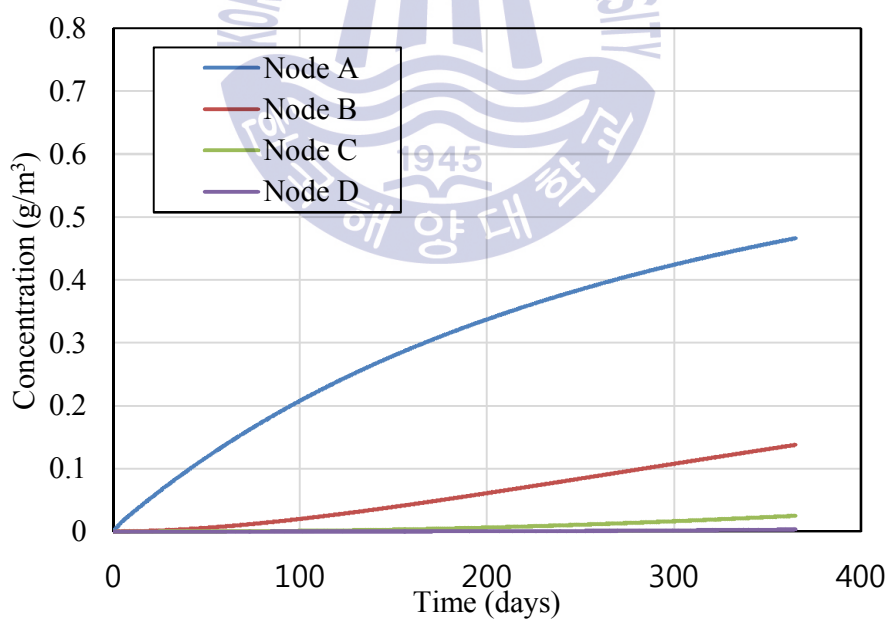


Figure 6.10 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under transient flow considering maximal tidal range of 2m

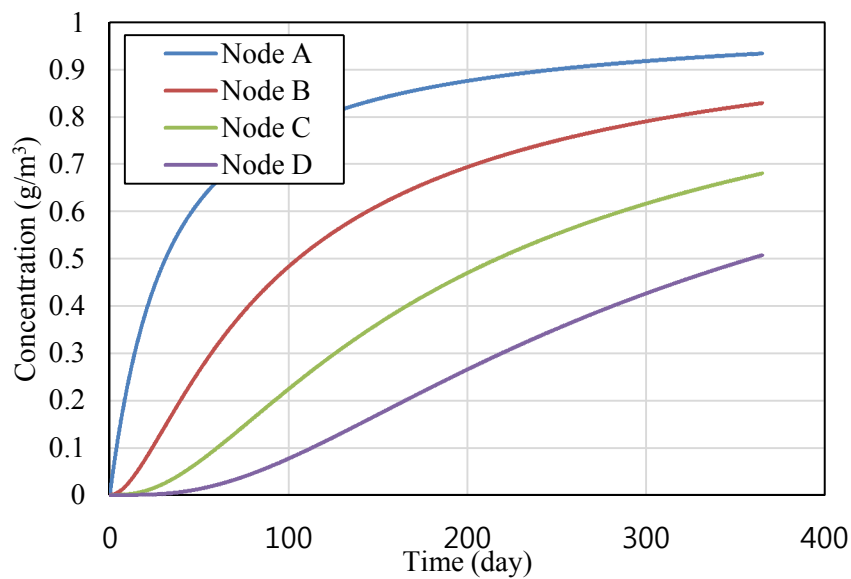


Figure 6.11 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under steady flow considering water level difference of 8m between sea and landfill sides

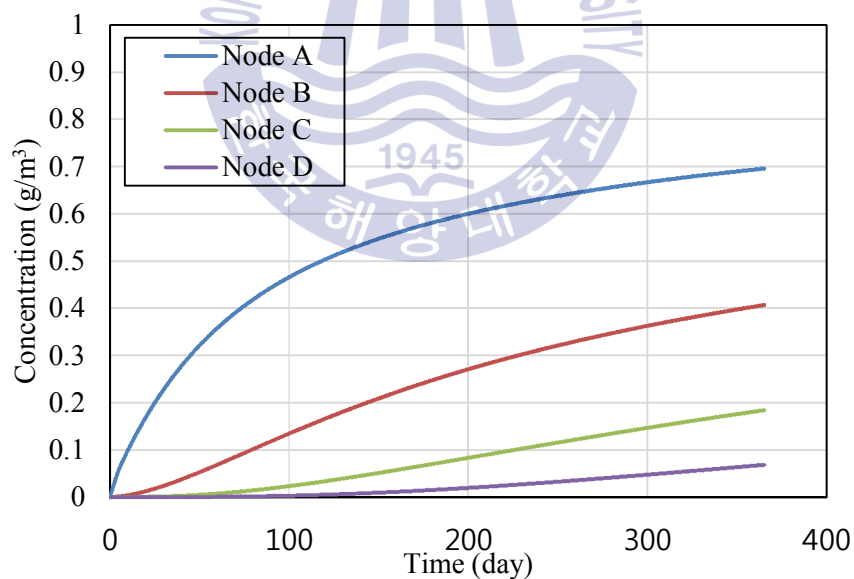


Figure 6.12 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under transient flow considering maximal tidal range of 8m

Figs. 6.13, 6.14는 오염물 농도 증가량 변동이 큰 초기 1.0일 기간만 확대하여 정상류 및 비정상류 조건을 비교하였다. ㉠은 약최고고조위(Approx.H.H.W), ㉡는 약최고고조위에서 약최저저조위로 수위가 내려갈 때의 평균해수면(M.S.L)이며, ㉢의 경우 약최저저조위에서 약최고고조위로 수위가 상승할때의 평균해수면(M.S.L)이다.

Figs. 6.9, 6.11의 정상류 상태에서는 변동없이 동일한 기울기로 증가하는 것으로 나타났다. 비정상류 상태에서는 조수차이에 따라 오염물 농도 확산이 더디게 나타나는 구간이 발생하는데, 더디게 나타나는 구간은 해수면 수위가 가장 높은 약최저저조위 구간이 아니라 Figs. 6.13, 6.14에서와 같이 약최고고조위에서 약최저저조위로 수위가 하강할 때 때(㉡ 상태)이며, 약최저저조위에서 약최고고조위로 수위가 상승할 때(㉢ 상태)는 오염물 농도가 증가하는 구간으로 나타났다.

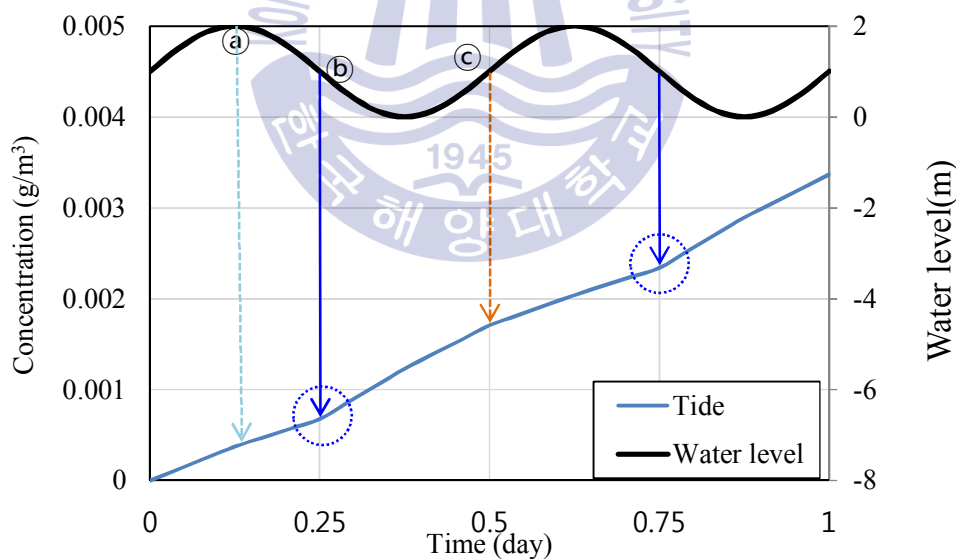


Figure 6.13 Comparison of time history of contaminant concentration between steady and transient flow during initial 1 day at Node A (case of maximal tidal range of 2m)

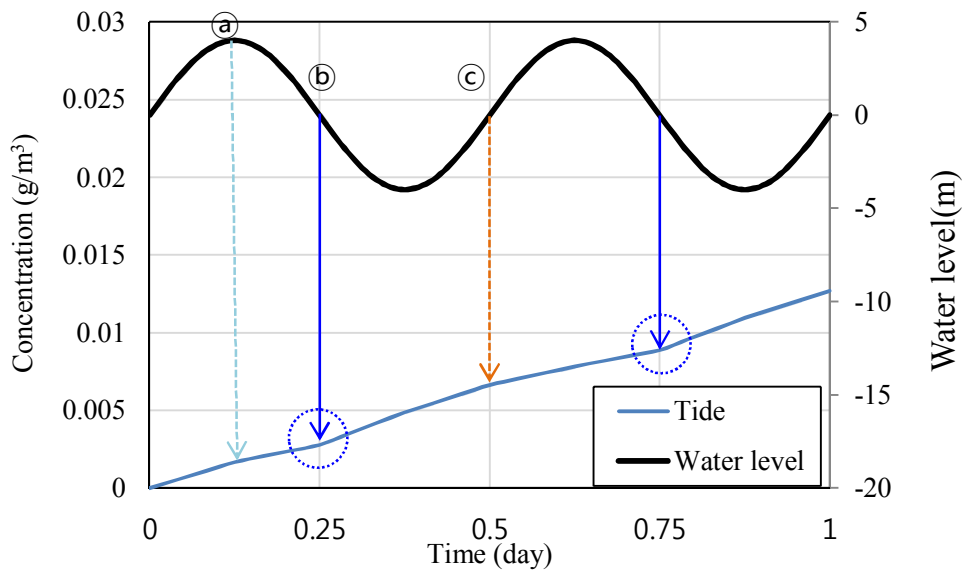
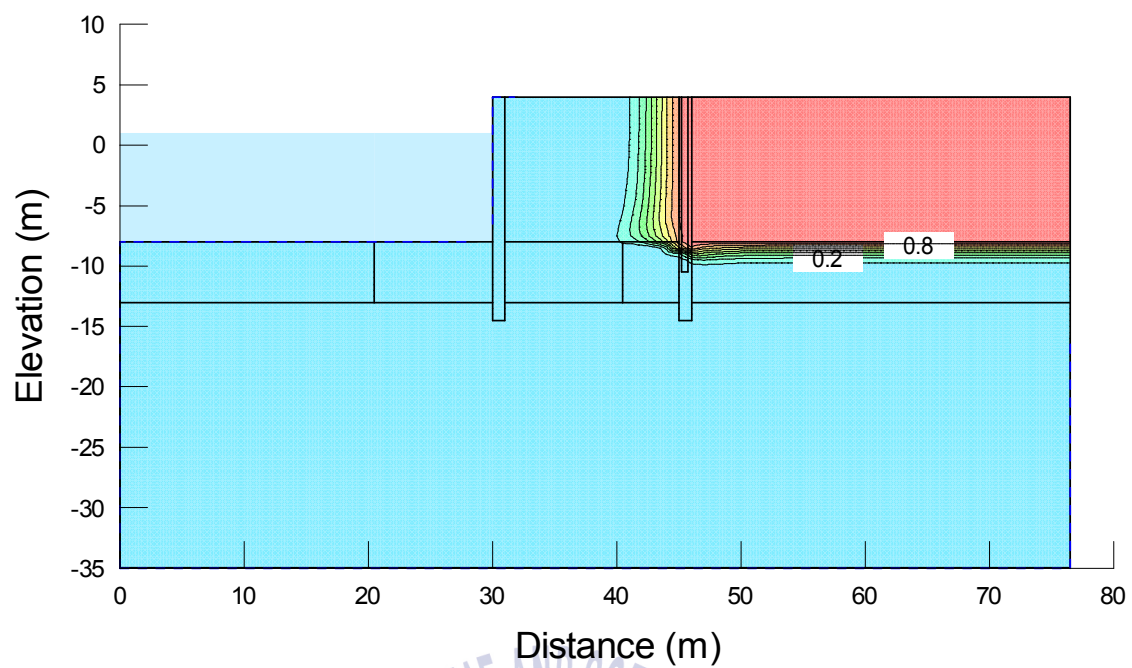
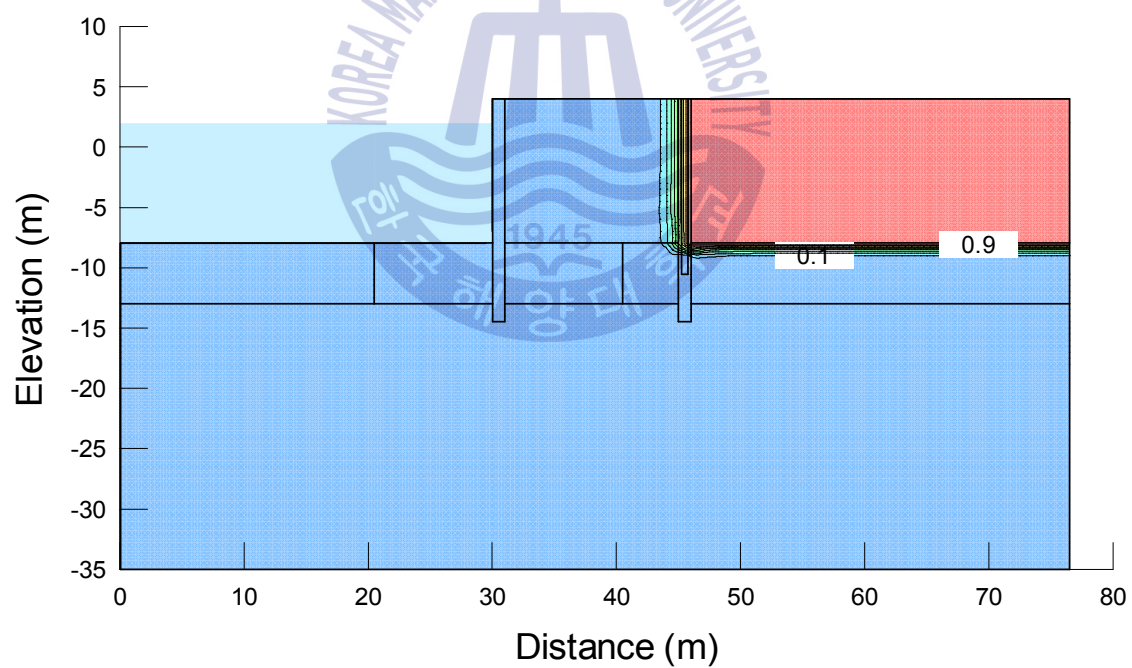


Figure 6.14 Comparison of time history of contaminant concentration between steady and transient flow during initial 1 day at node A (case of maximal tidal range of 8m)

Figs. 6.15와 6.16에서는 정상류 조건 및 비정상류 조건에서의 1년 후 오염물 농도 분포를 나타내고 있다. 수위 변동을 고려한 비정상류 조건보다 정상류 조건에서 오염물 농도 분포가 크게 나타나므로 정상류 조건 하에서 차수시스템의 차수성능을 평가하는 것이 보다 보수적인 결과를 보인다. 따라서, 수위 변동을 고려한 비정상류 해석보다 수위를 일정하게 두고 정상류 조건으로 해석하는 것이 계산비용적인 측면에서 보다 효과적임이 확인되었다. 더욱이 해상 폐기물매립장의 경우 폐기물 지층의 관리수위를 일반적으로 해역의 평균 수위보다 낮게 유지하므로 실제 현장에서의 오염물 이동은 정상류 조건 하에서의 경우보다 훨씬 작게 발생할 것으로 판단된다.

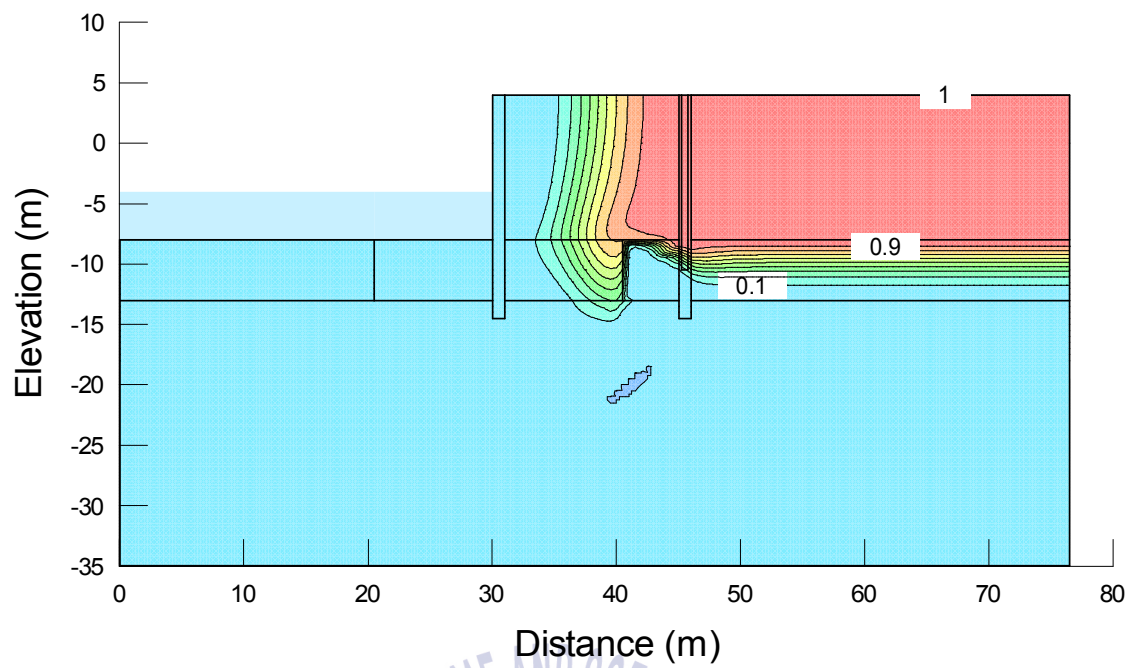


(a) steady flow

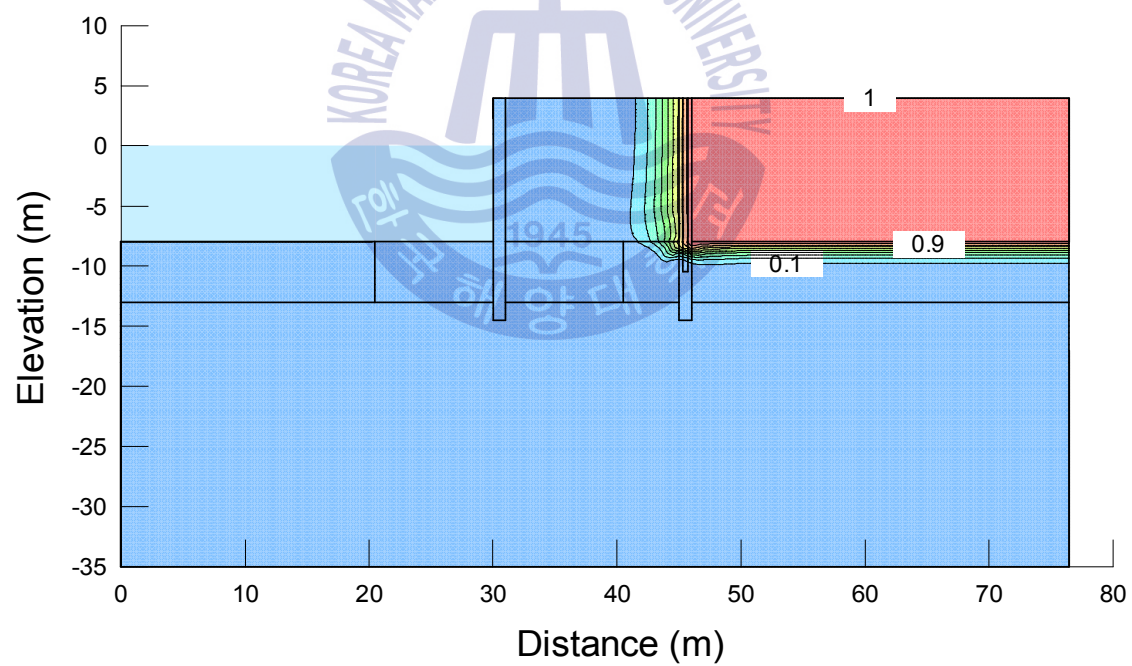


(b) transient flow

Figure 6.15 Contour plots of contaminant concentration after 1 yr. (case of maximal tidal range of 2m)



(a) steady flow



(b) transient flow

Figure 6.16 Contour plots of contaminant concentration after 1 yr. (case of maximal tidal range of 8m)

6.1.3 경사제식 호안

경사제식 호안에서도 2중 연직벽체시 검토시와 동일한 조건으로 검토하였으며, Fig. 6.17에서는 정상류 조건 하에서의 전수두 분포 및 지반내 간극수의 유속 벡터를 나타낸다. 조위차 2m에 대응하는 정상류 해석의 경우 폐기물매립장 내부 관리수위가 해역의 수위 보다 1m 높게 유지되므로 전수두 분포의 등수두 선이 폐기물 층이 2m로 높고 바닥 차수시스템을 통과하며 감소하며 해역에서의 해저지반에서 1m의 전수두 분포를 나타낸다. 그에 따라 간극수의 흐름은 전수두가 높은 내부에서 외부로의 흐름이 발생한다. 특히 차수시트에 의한 차수 시스템을 통한 흐름은 거의 발생하지 않고 그 하부로 간극수의 흐름이 발생하는 것으로 나타났다.

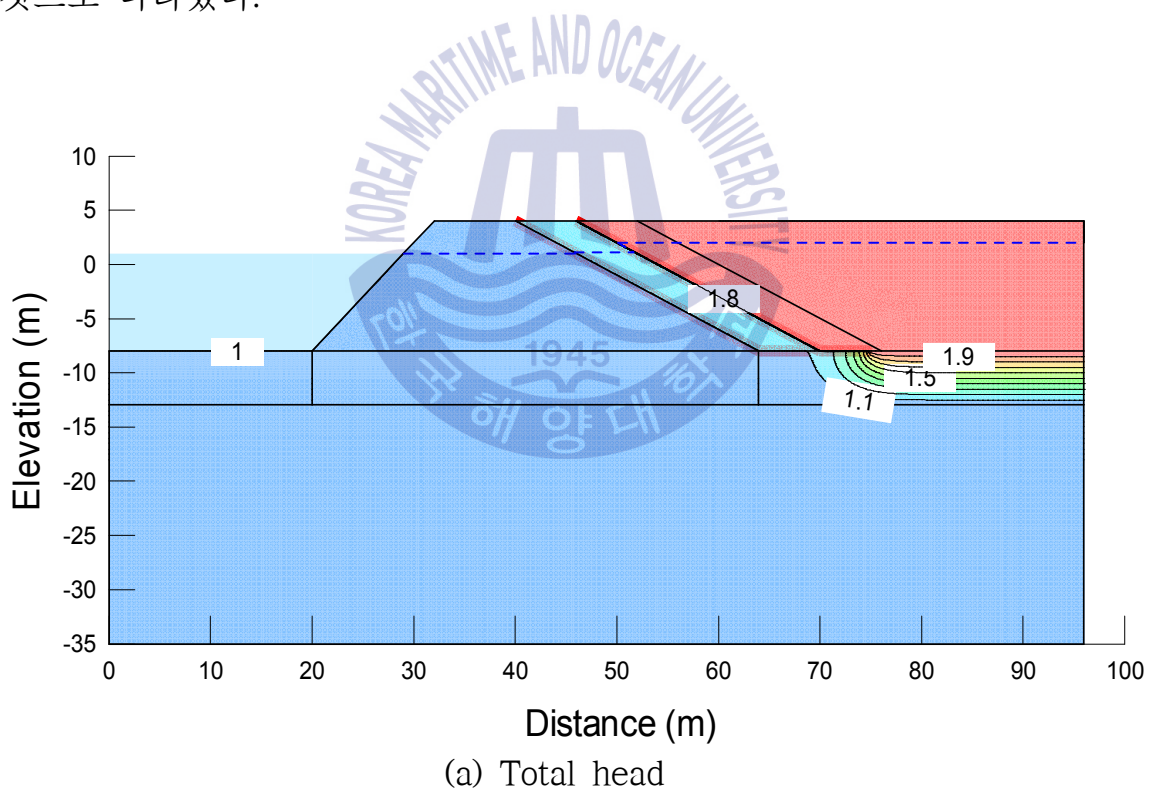
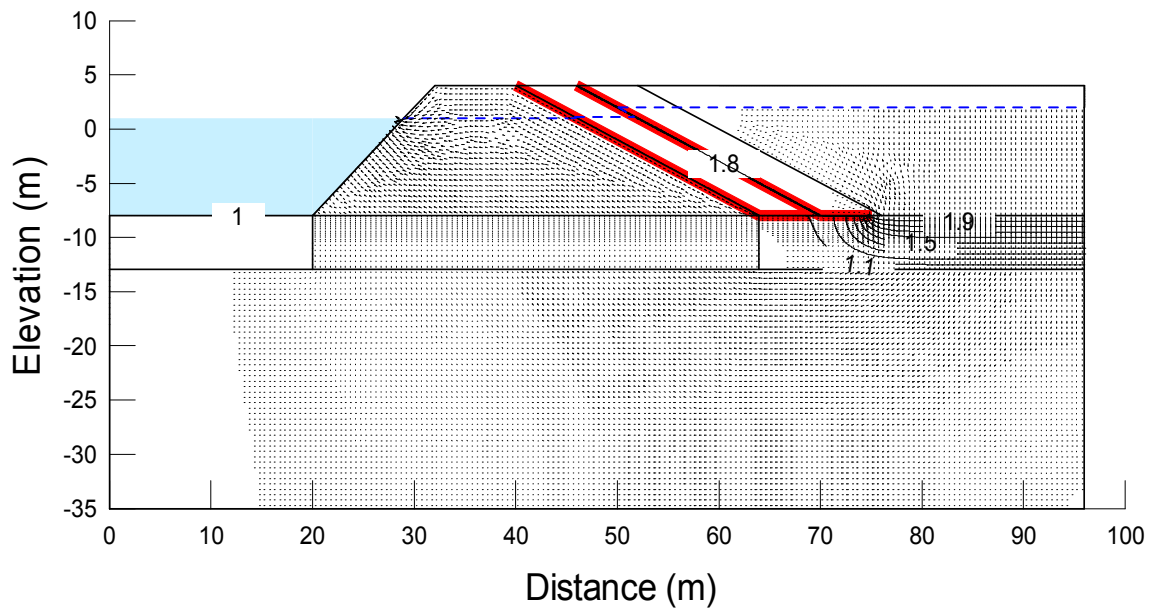


Figure 6.17 Predicted plots of total head and flow vectors under steady flow in rubble mound type landfill (case of water level difference of 2m)



(b) Flow vectors

Figure 6.17 Predicted plots of total head and flow vectors under steady flow in rubble mound type landfill (case of water level difference of 2m) (continued)

조위차 8m에 대응하는 정상류 해석의 경우의 경우 폐기물매립장 내부 관리 수위가 해역의 수위 보다 4m 높게 유지되므로 전수두 분포의 등수두선이 폐기물 층에서 바닥 차수시스템을 통과하며 감소하며 해역에서의 해저지반에서 -4m의 전수두 분포를 나타낸다. 그에 따라 간극수의 흐름은 전수두가 높은 내부에서 외부로의 흐름이 발생한다. 특히 조위차가 큼에 따라 2중 연직벽체 전면을 따라 흐름이 발생하는 것으로 나타났으며, 차수시트를 통과하는 수평흐름은 적은 것으로 나타났다.

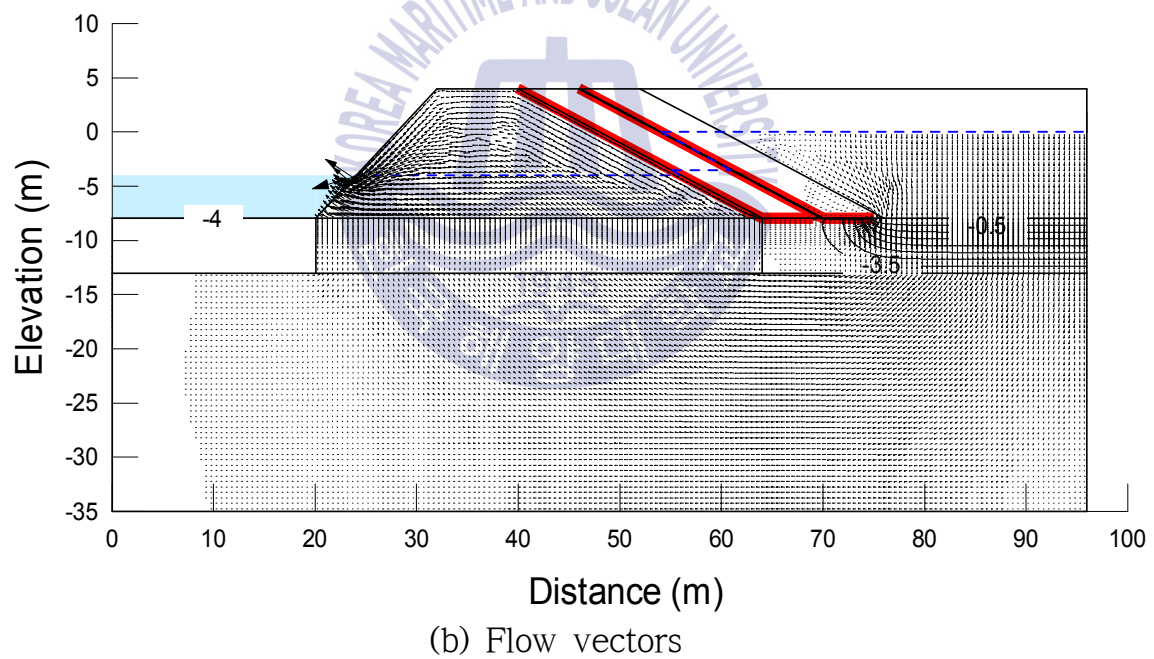
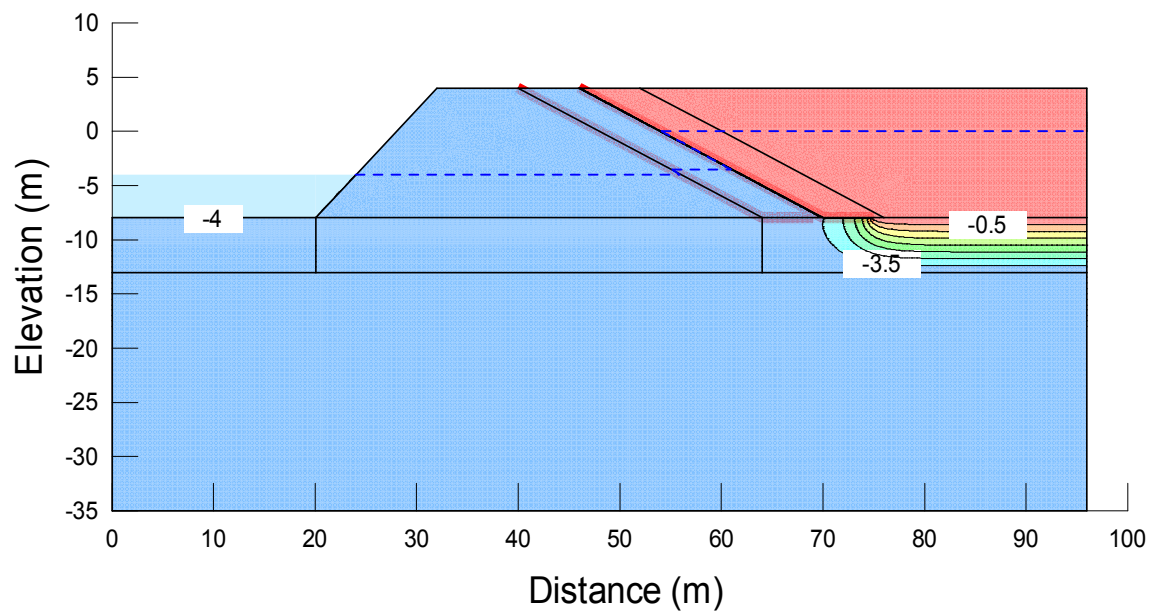


Figure 6.18 Predicted plots of total head and flow vectors under steady flow in rubble mound type landfill (case of water level difference of 4m)

Figs. 6.19 ~ 6.22는 각각 조석에 따른 수위변동을 고려한 비정상류 조건 하에 서의 전수두 분포 및 간극수의 유속벡터를 나타낸다. 수위 변동에 따라 기반내 간극수 흐름이 시간에 따라 크기 및 방향이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 해역의 수위가 폐기물매립장의 관리수위보다 높은 경우 2중 연직벽체 호안과 동일하게 차수 해역에서 폐기물매립장 내부로의 간극수 흐름이 발생하는 것으로 나타났다.

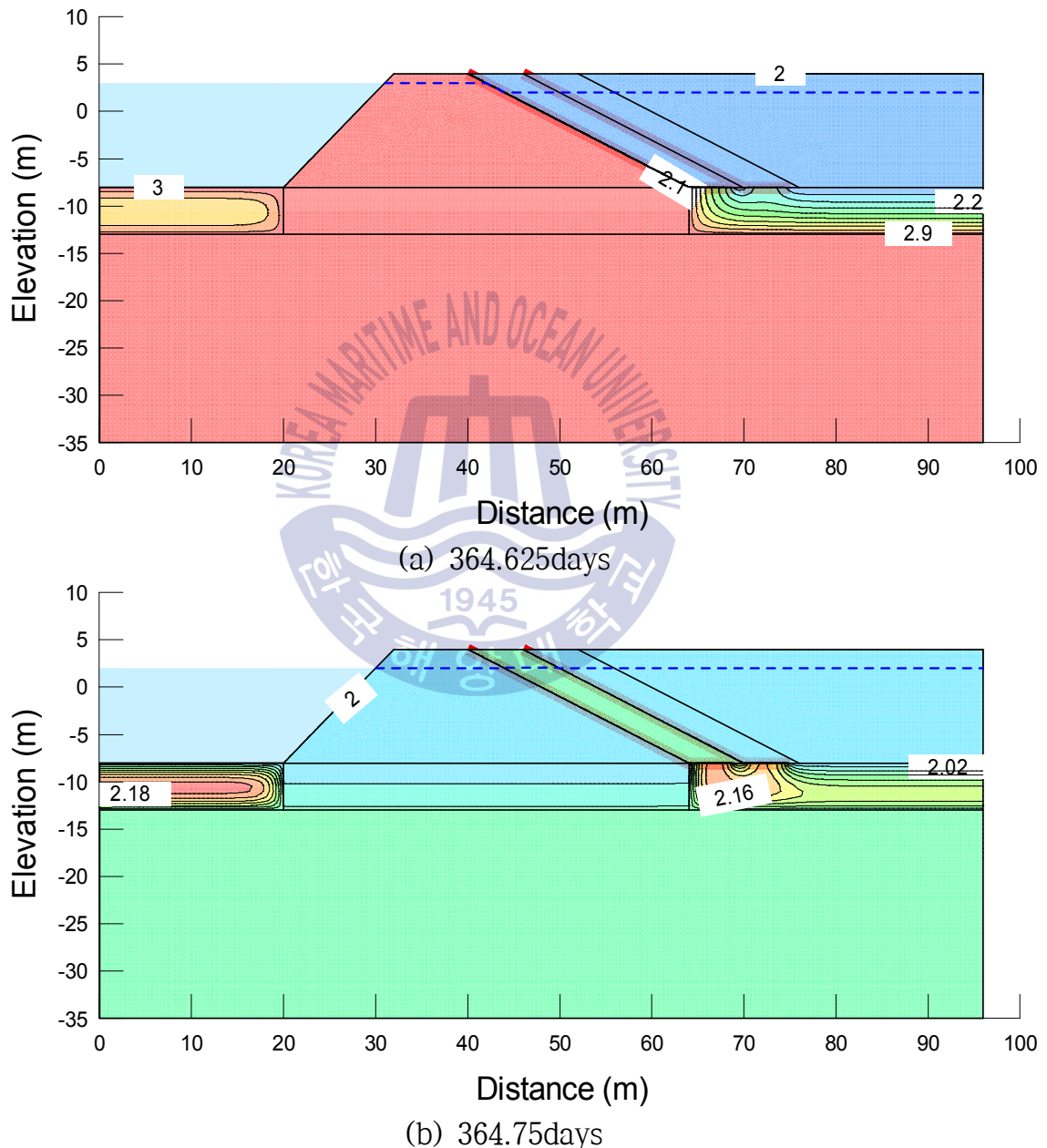
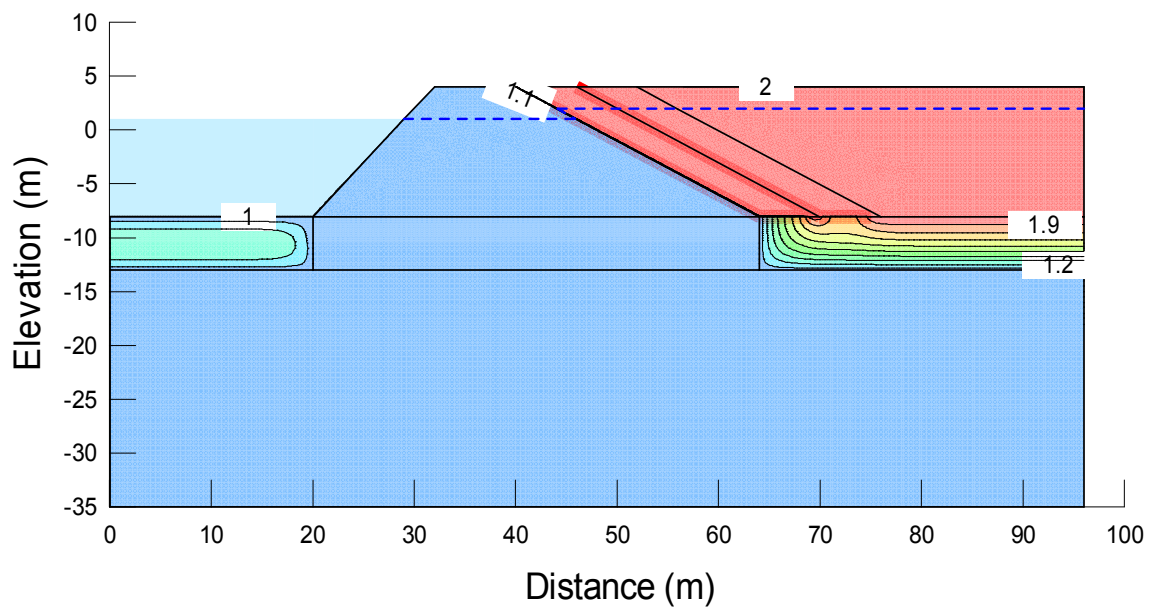
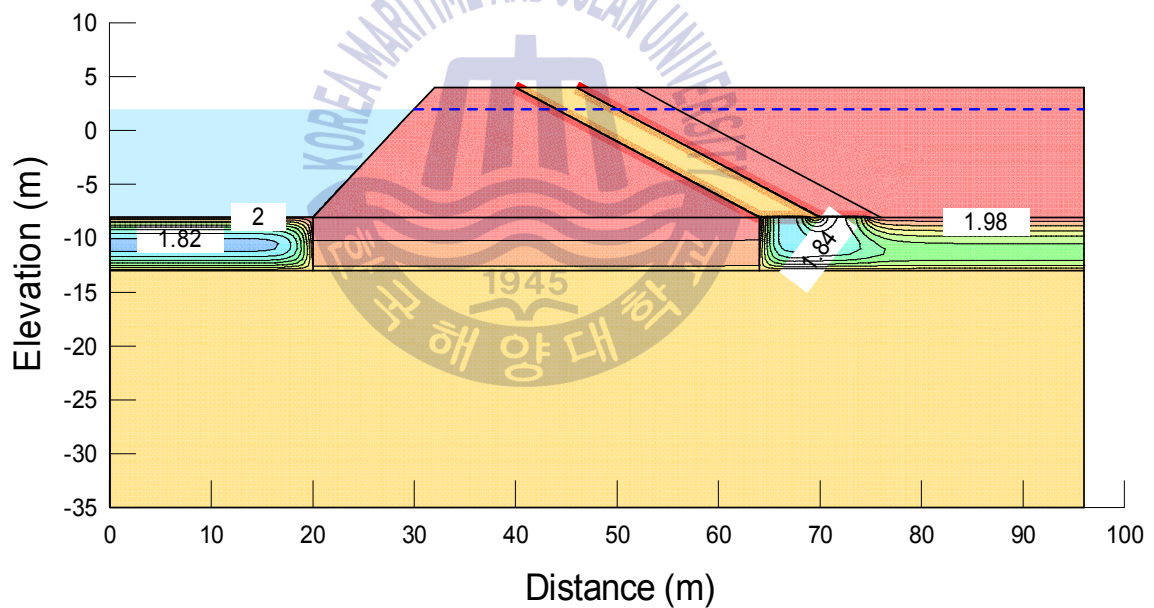


Figure 6.19 Predicted plots of total head at the last four specific times under transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 2m)

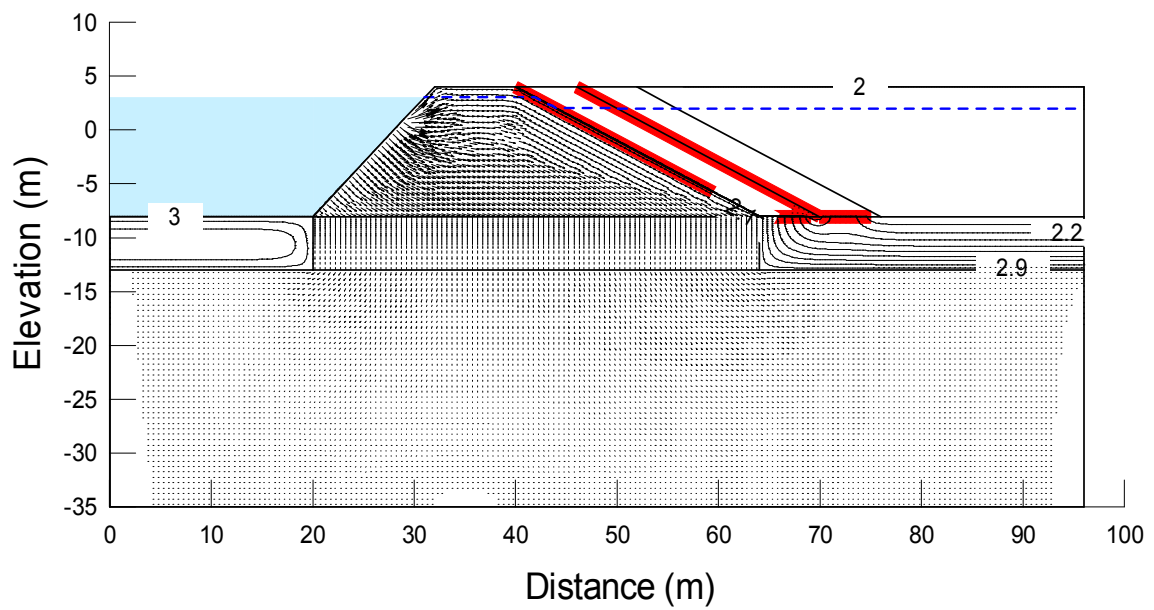


(c) 364.875days

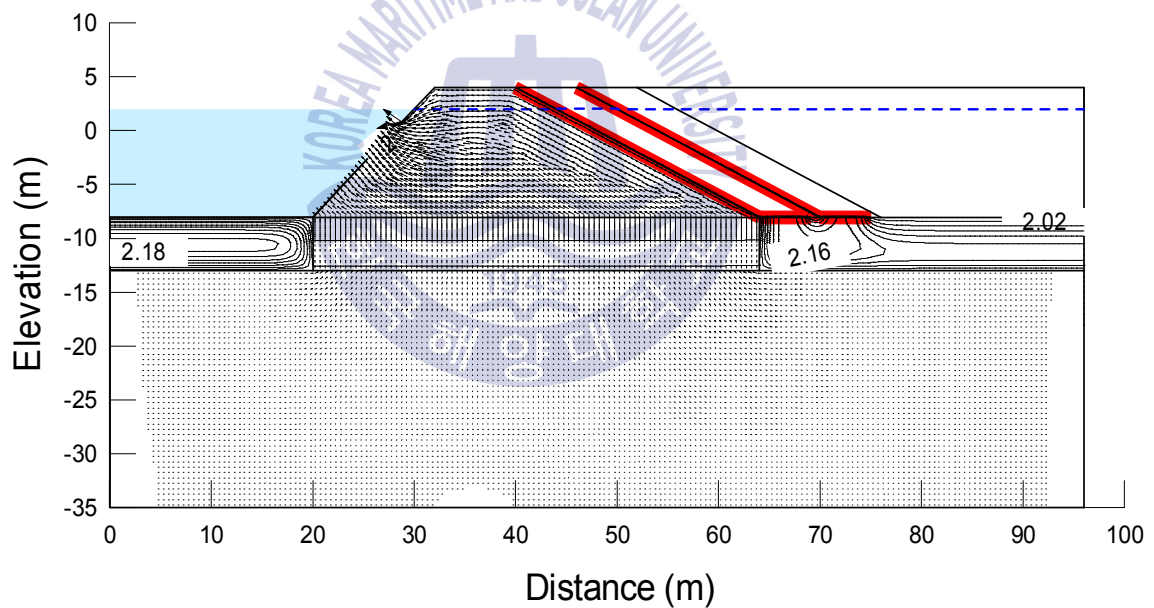


(d) 365.0days

Figure 6.19 Predicted plots of total head at the last four specific times under transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 2m) (continued)

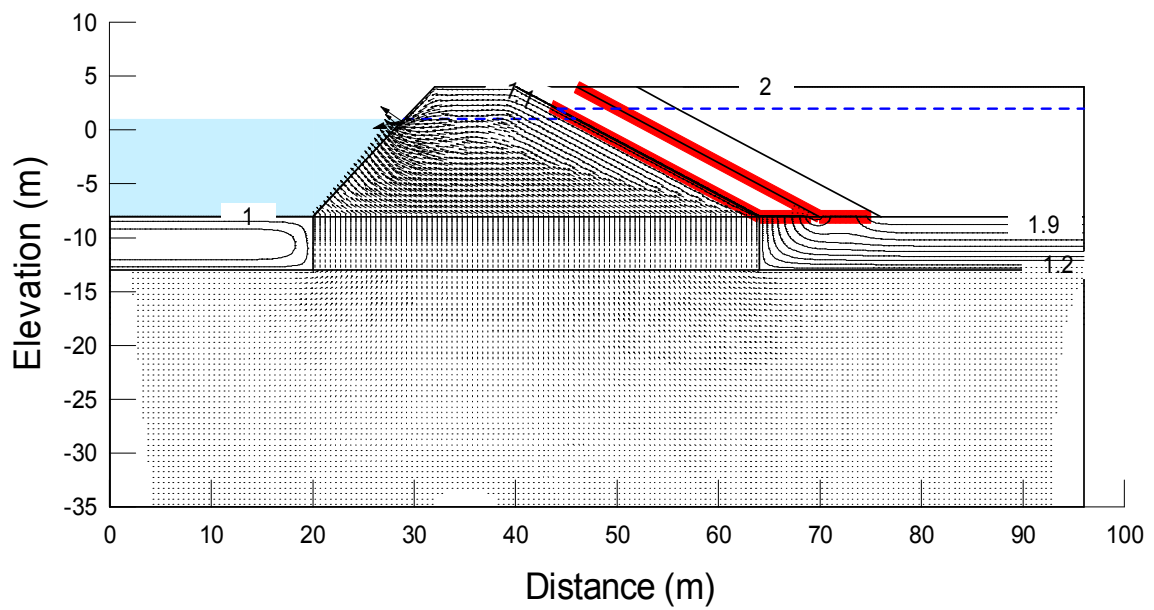


(a) 364.625days

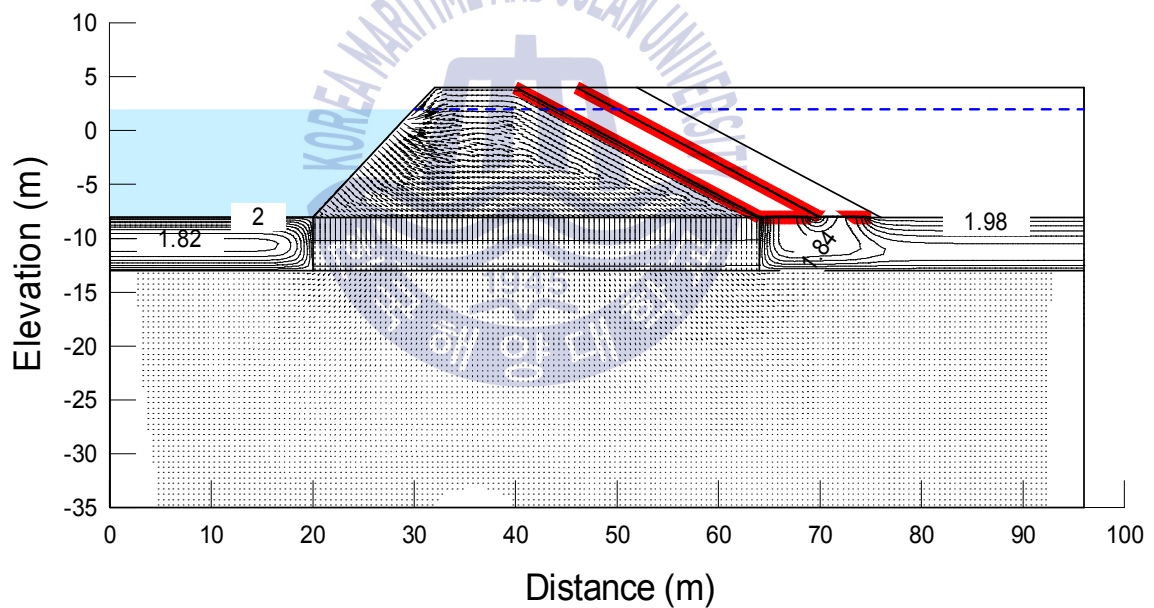


(b) 364.75days

Figure 6.20 Predicted plots of flow vectors at the last four specific times under transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 2m)

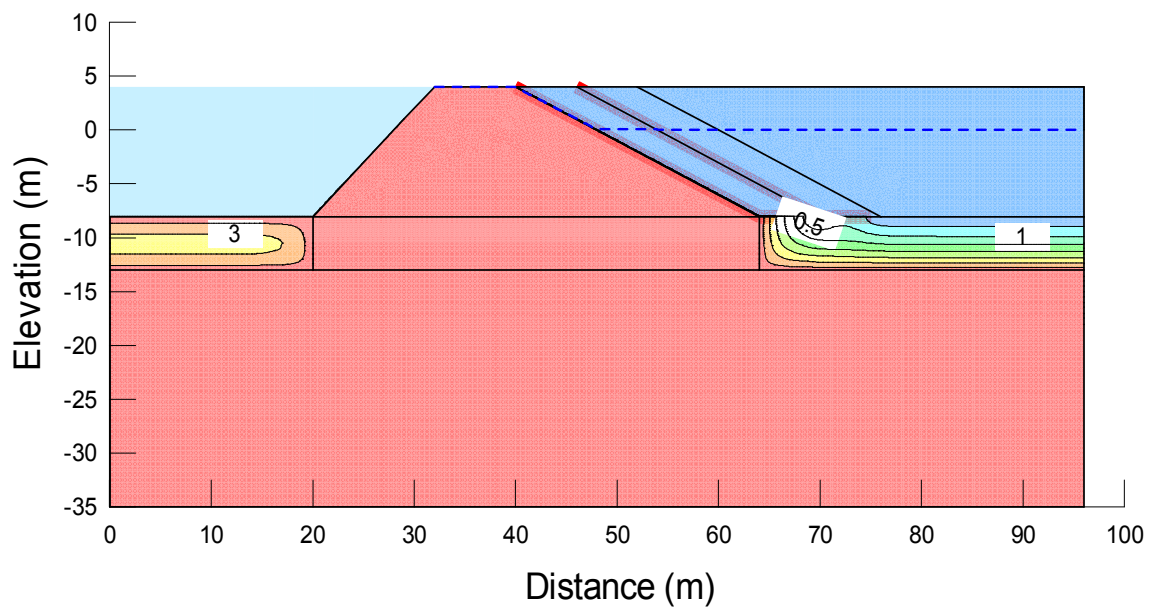


(c) 364.875days

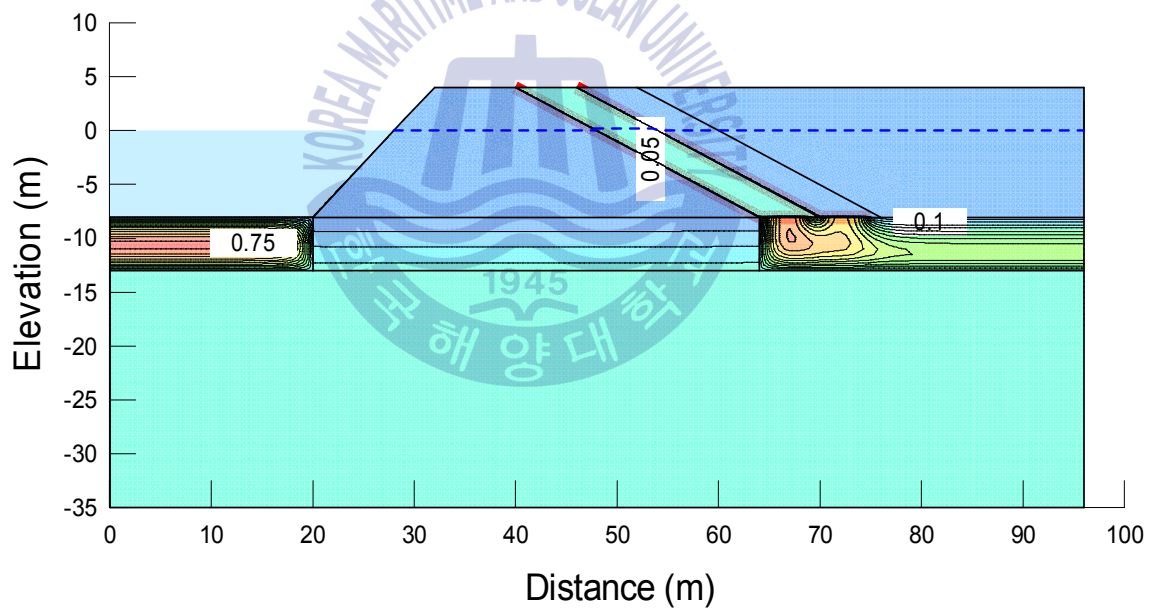


(d) 365.0days

Figure 6.20 Predicted plots of flow vectors at the last four specific times transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 2m) (continued)

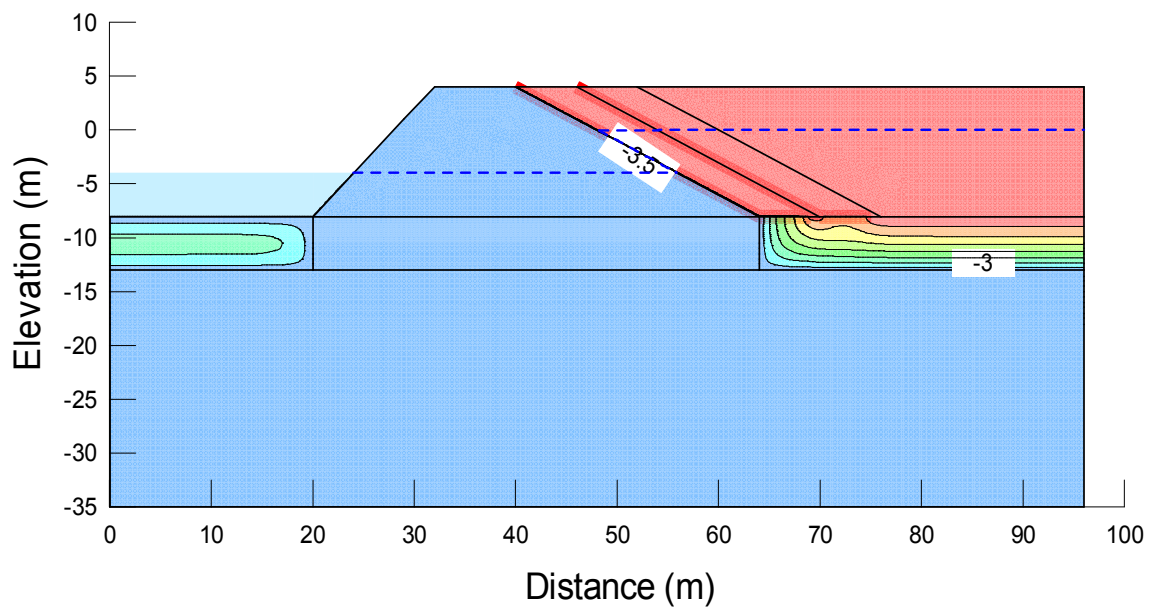


(a) 364.625days

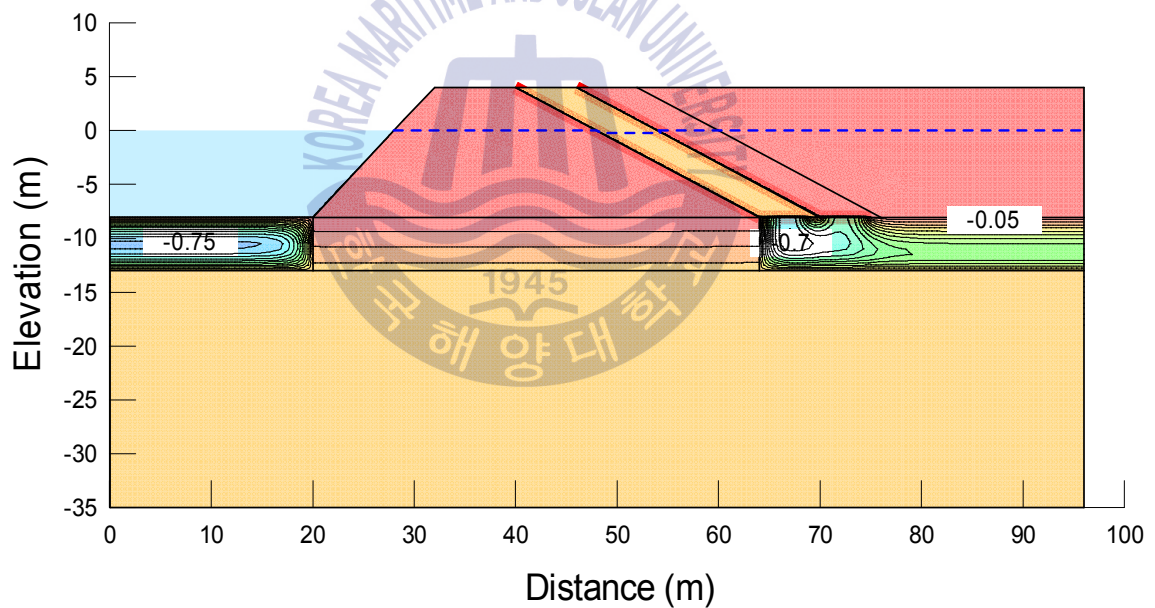


(b) 364.75days

Figure 6.21 Predicted plots of total head at the last four specific times under transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 8m)

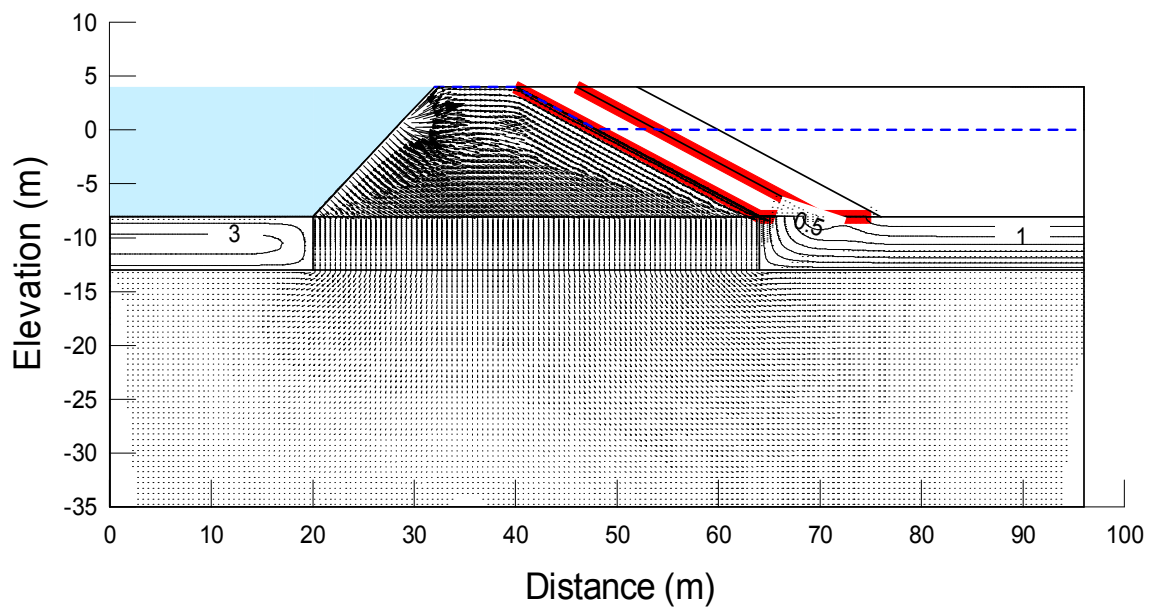


(c) 364.875days

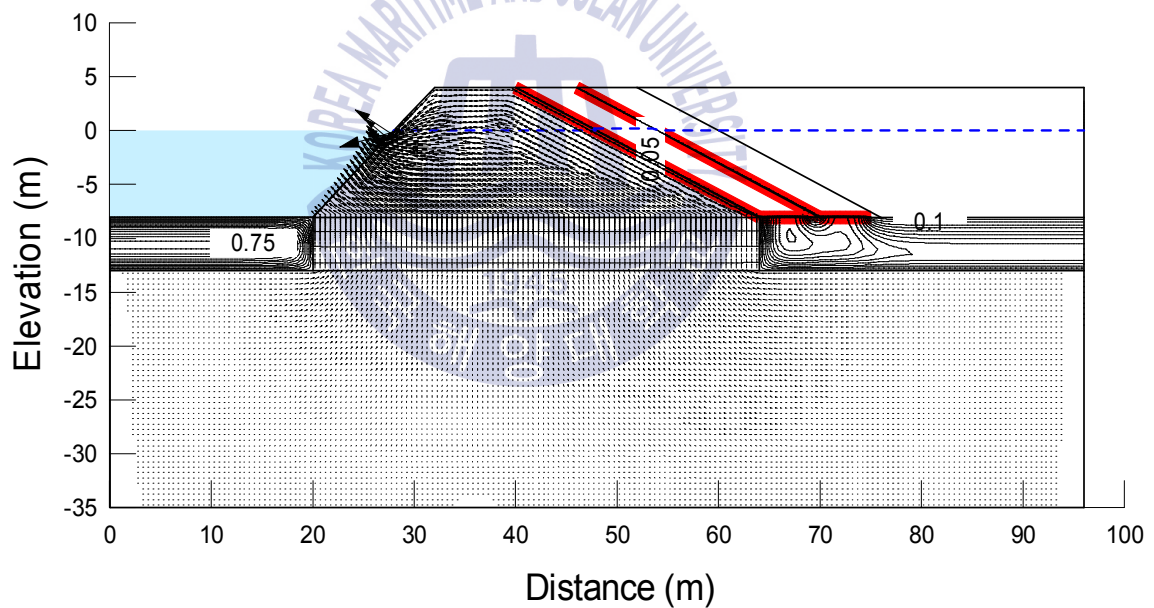


(d) 365.0days

Figure 6.21 Predicted plots of total head at the last four specific times under transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 8m) (continued)

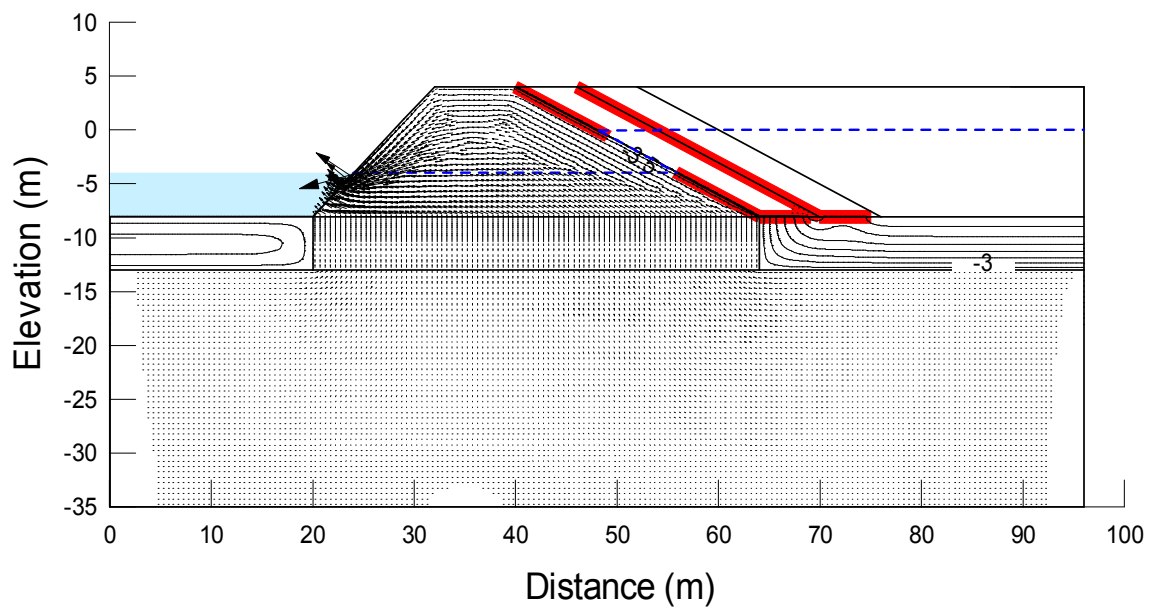


(a) 364.625days

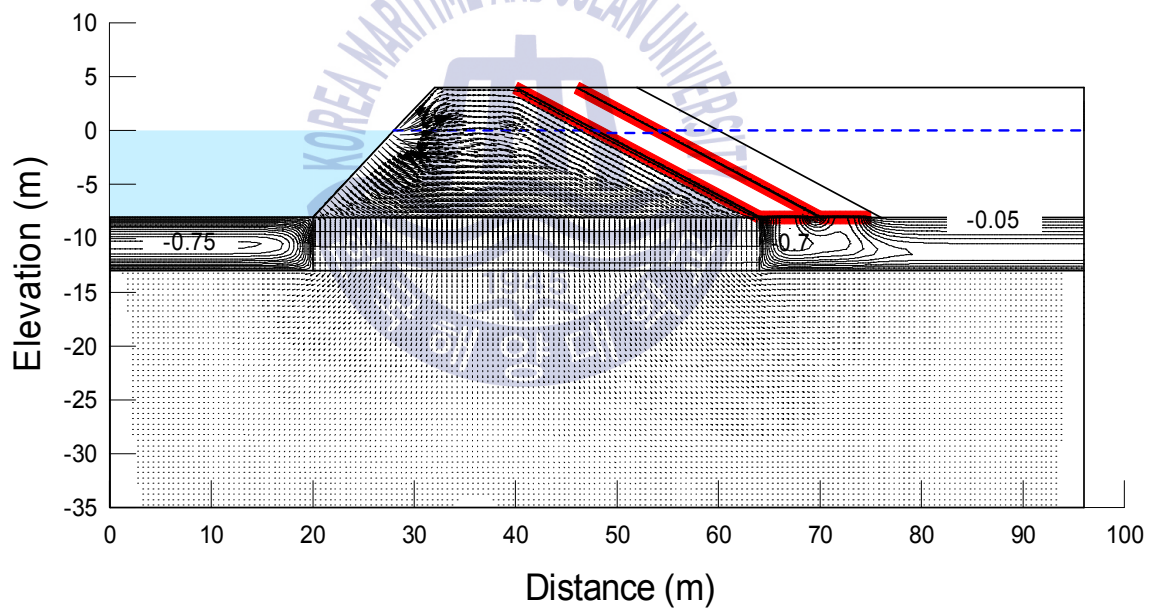


(b) 364.75days

Figure 6.22 Predicted plots of flow vectors at the last four specific times under transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 8m)



(c) 364.875days



(d) 365.0days

Figure 6.22 Predicted plots of flow vectors at the last four specific times under transient flow in rubble mound type landfill (case of maximal tidal range of 8m) (continued)

Fig. 6.23은 차수시트 차수시스템에서 폐기물 지층의 방향으로 약 1m 떨어진 바닥 차수시스템 상부 표면 부근에서의 시간에 따른 오염물 농도 변화를 나타내기 위한 각 노드의 위치를 나타낸다. 각 노드 A, B, C, D는 상부에서 하부로 순서대로 상부가 A 하부가 D를 나타낸다.

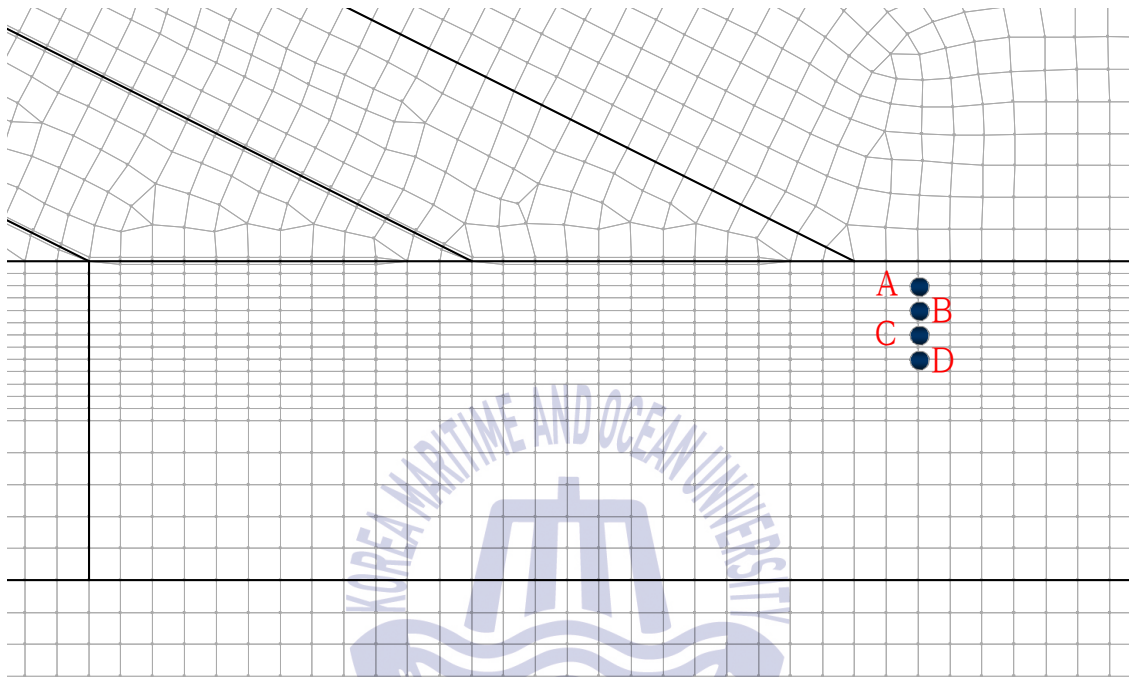


Figure 6.23 Four monitoring nodes to present time history graph of contaminant concentration in rubble mound type quay wall

Figs. 6.24와 6.25는 조위차 2m일 경우의 각각 정상류 조건 하와 수위 변동을 고려한 비정상류 조건 하에서의 각 노드별 시간에 따른 오염물 농도 변화를 나타낸다. 그림에서처럼 수위 변동을 고려한 비정상류 조건보다 정상류 조건 하에서 오염물의 농도가 증가하는 것으로 나타났다.

Figs. 6.26과 6.27은 조위차 8m일 경우의 각각 정상류 조건 하와 수위 변동을 고려한 비정상류 조건 하에서의 각 노드별 시간에 따른 오염물 농도 변화를 나타낸다. 조위차 8m일 경우에도 2m와 동일하게 비정상류 조건보다 정상류 조건 하에서 오염물의 농도가 증가하는 것으로 나타났다.

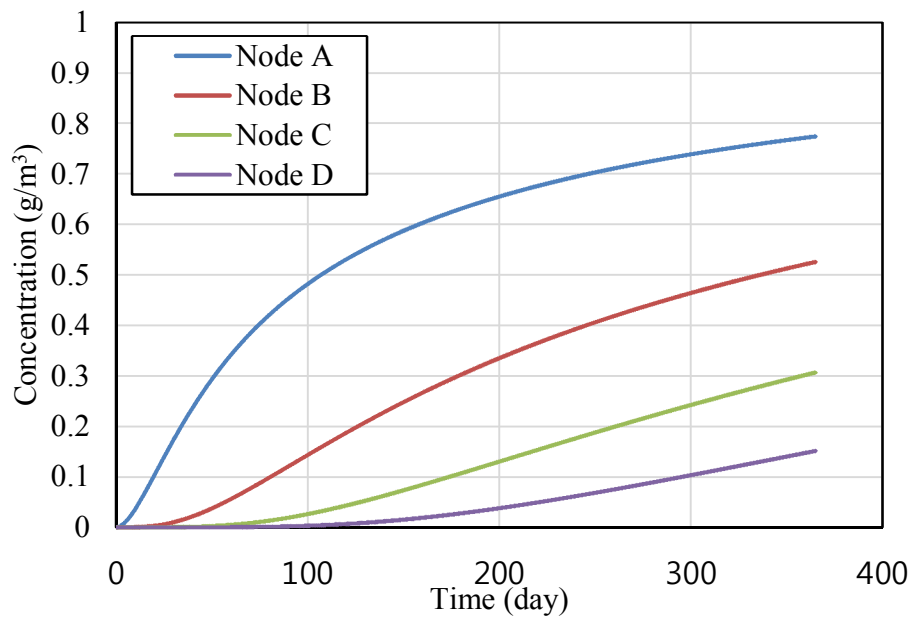


Figure 6.24 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under steady flow considering water level difference of 2m between sea and landfill sides

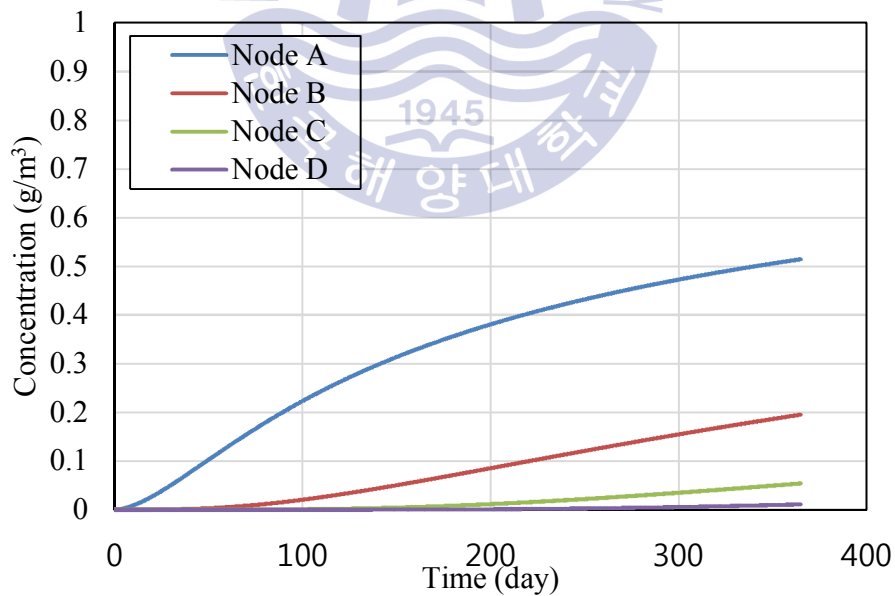


Figure 6.25 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under transient flow considering maximal tidal range of 2m

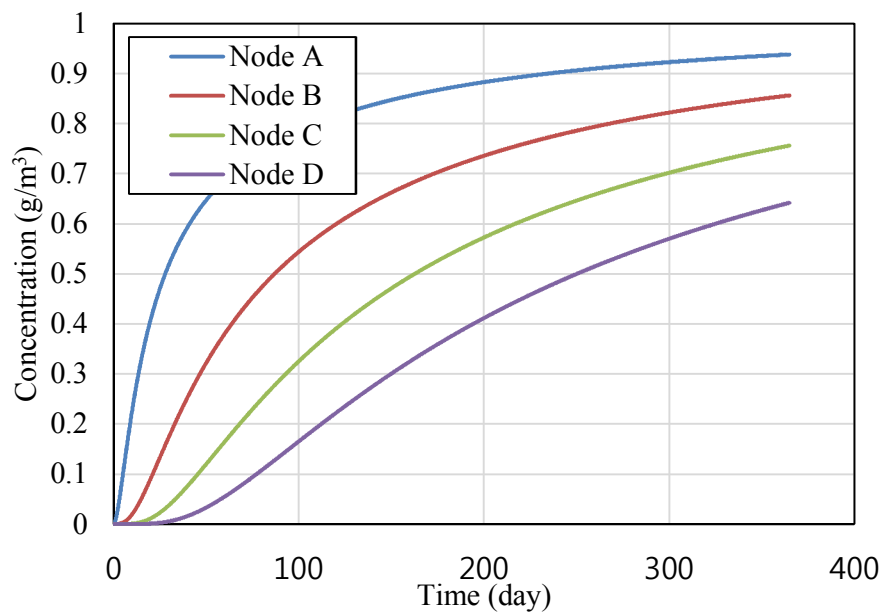


Figure 6.26 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under steady flow considering water level difference of 8m between sea and landfill sides

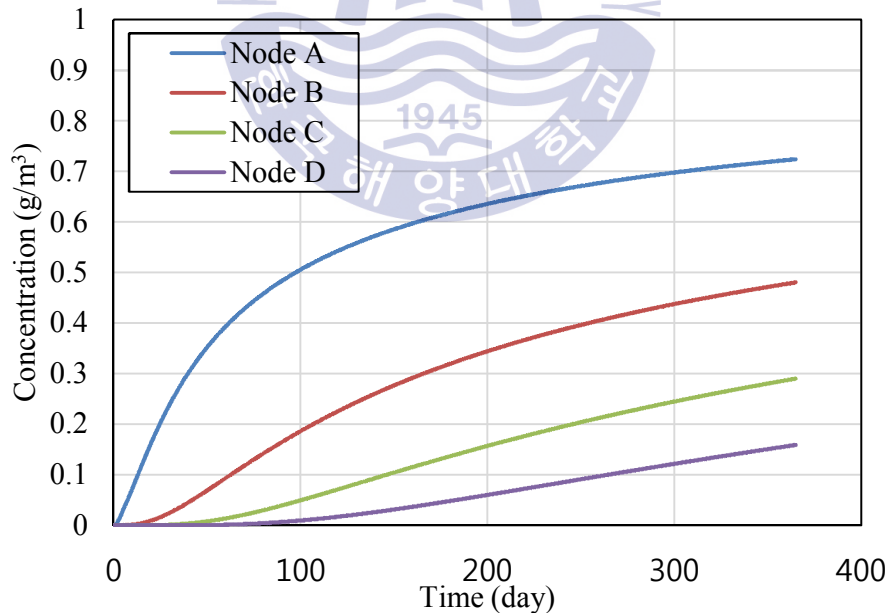


Figure 6.27 Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under transient flow considering maximal tidal range of 8m

Figs. 6.28, 6.29에서는 2중 연직벽체시와 동일하게 오염물 농도 증가량 변동이 큰 초기 1.0일 기간만 확대하여 정상류 및 비정상류 조건을 비교하였다. ㉠는 약최고고조위(Approx.H.H.W), ㉡는 약최고고조위에서 약최저저조위로 수위가 내려갈 때의 평균해수면(M.S.L)이며, ㉢의 경우 약최저저조위에서 약최고고조위로 수위가 상승할때의 평균해수면(M.S.L)이다.

Figs. 6.24, 6.26의 정상류 상태에서는 변동없이 동일한 기울기로 증가하는 것으로 나타났다. 비정상류 상태에서 오염물 농도가 확산이 더디게 나타나는 구간은 2중 연직벽체 호안과 동일하게 약최저저조위로 수위가 하강할 때(㉡ 상태)로 나타났고, 약최저저조위에서 약최고고조위로 수위가 상승할 때(㉢ 상태)는 오염물 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 2중 연직벽체호안보다는 그 경향성이 다소 약하게 나타났다.

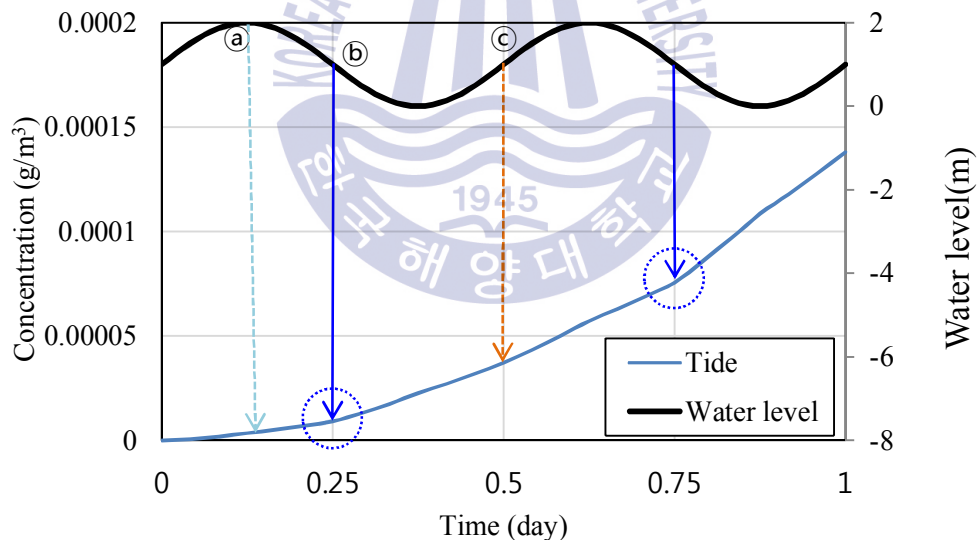


Figure 6.28 Comparison of time history of contaminant concentration between steady and transient flow during initial 1 day at Node A (case of maximal tidal range of 2m)

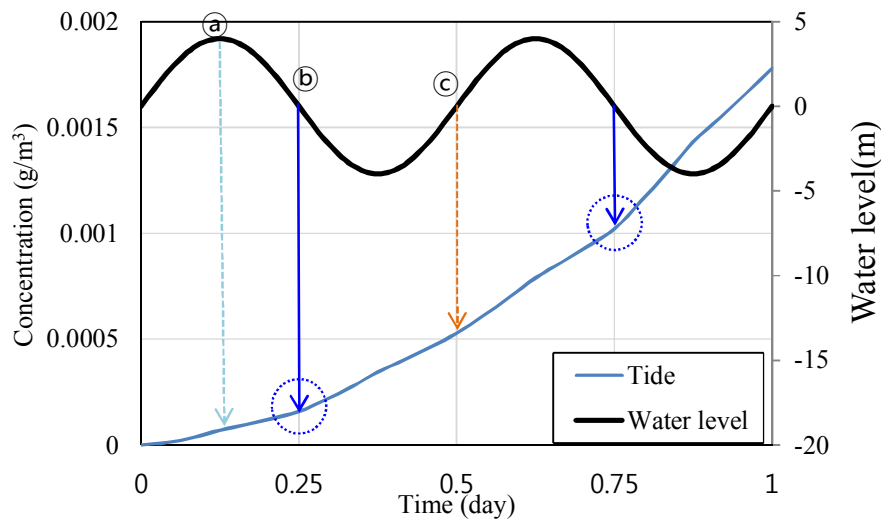
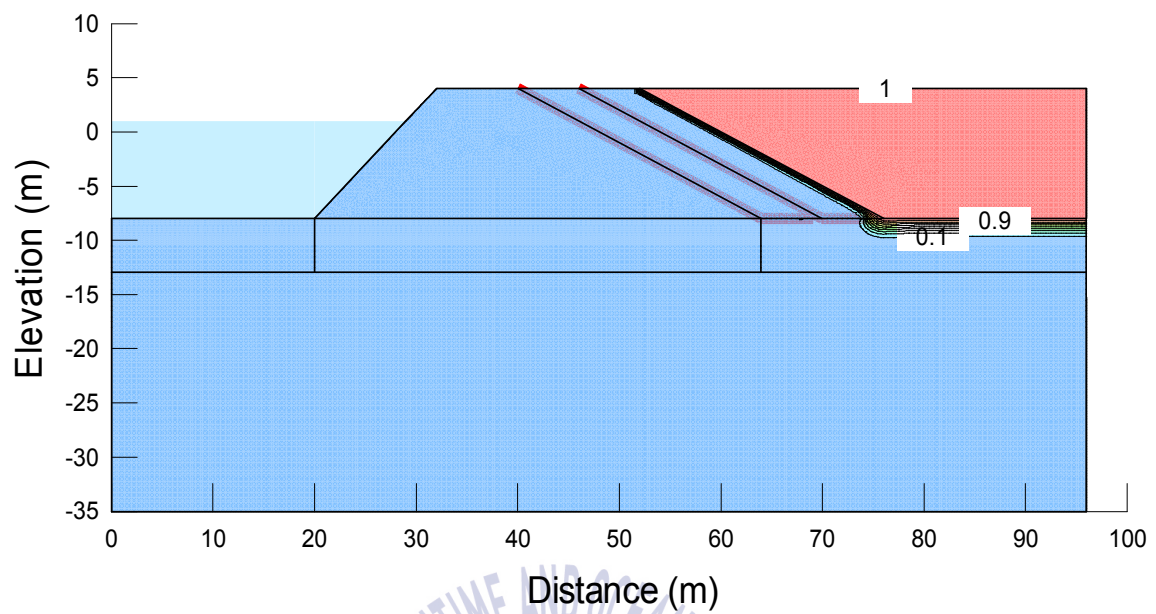
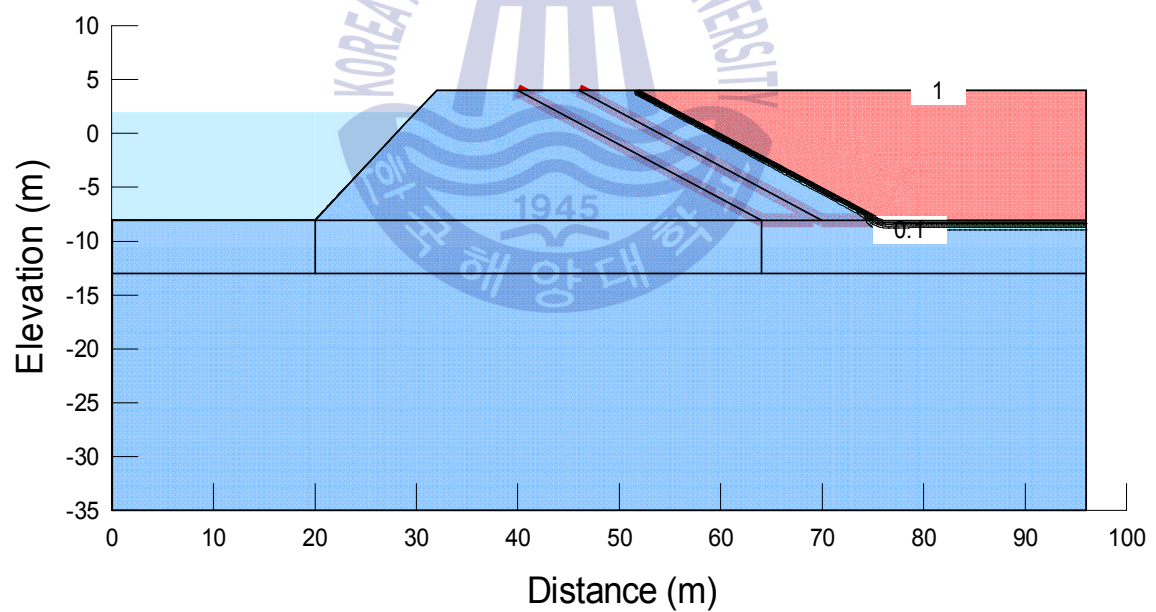


Figure 6.29 Comparison of time history of contaminant concentration between steady and transient flow during initial 1 day at Node A (case of maximal tidal range of 8m)

Figs. 6.30과 6.31에서는 정상류 조건 및 비정상류 조건에서의 1년 후 오염물 농도 분포를 나타내고 있다. 경사제식 호안의 경우에도 비정상류 조건 하에서 보다 정상류 조건 하에서 차수시스템의 차수성능을 평가하는 것이 더욱 보수적인 결과로 나타났다. 그리고 조위차 2m일 경우와 8m일 경우를 비교하면 조위차가 작을수록 정상류조건에서의 오염물의 농도가 증가됨을 알 수 있다.

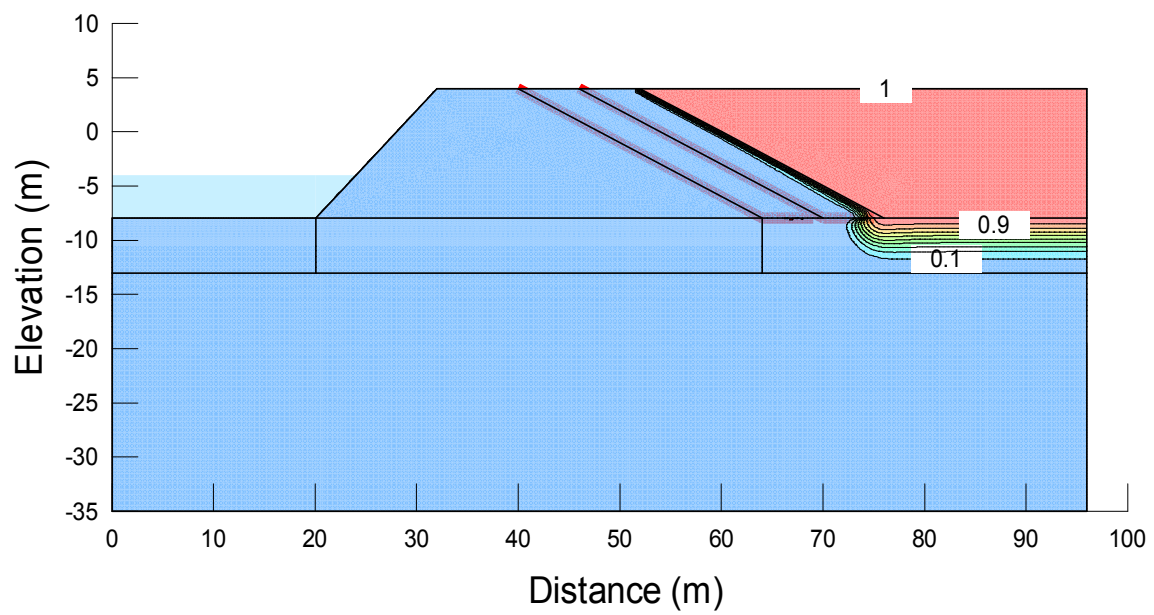


(a) steady flow

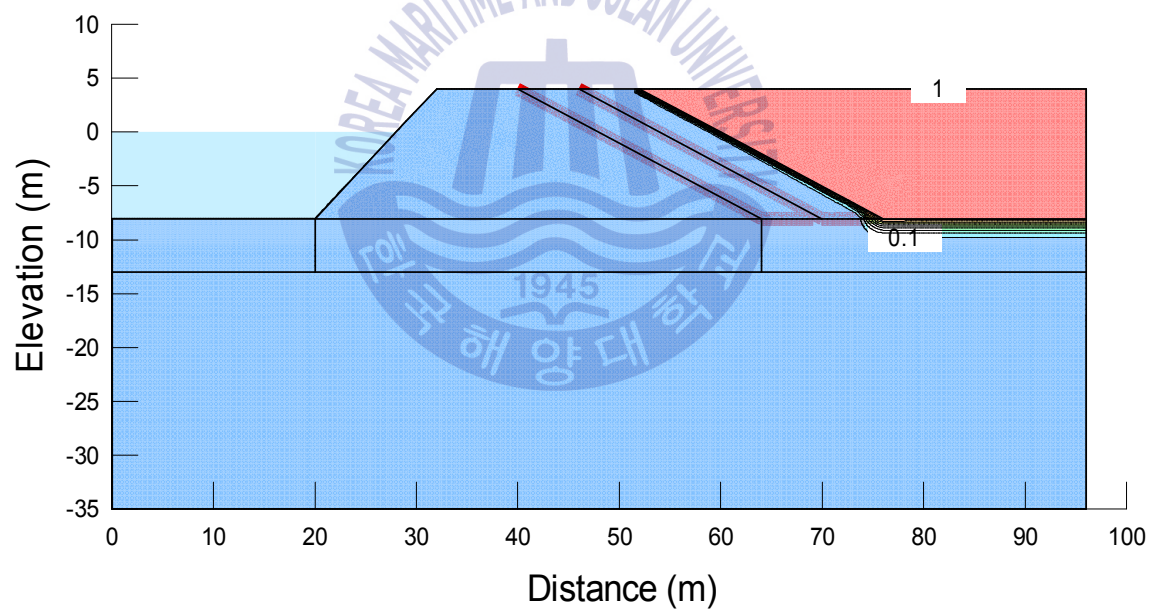


(b) transient flow

Figure 6.30 Contour plots of contaminant concentration after 1 yr. (case of maximal tidal range of 2m)



(a) steady flow



(b) transient flow

Figure 6.31 Contour plots of contaminant concentration after 1 yr. (case of maximal tidal range of 8m)

6.2 내수위 관리에 따른 영향

6.2.1 개요

육상에서와 달리 해상에서는 차수재료로 육상에서와 동일한 성능의 것을 사용하더라도 해수위를 폐기물매립장 내 침출수위보다 높게 설정하여 관리한다면 기본적으로 폐기물의 침출수가 해양으로 유입될 수 없는 조건이 된다. 그러므로 내수위 관리에 따른 영향을 확인하기 위하여 본 절에서는 정상류 하에서의 차수성능평가 결과를 반영하고 내수위가 해수위보다 +1.0, +0.5, ± 0.0 , -0.5, -1.0, -1.5, -2.0m 차이나도록 설정하여 2차원 침투·이류 분산해석을 실시하였다.

6.2.2 2중 연직벽체 호안

Fig. 6.28은 측면벽체 차수시스템에서 약 1m 떨어진 위치에서 폐기물 지층 바로 하단 위치에서 해역 방향으로 유로의 흐름방향으로 시간에 따른 오염물 농도 변화를 나타내기 위한 각 노드의 위치를 나타낸다.

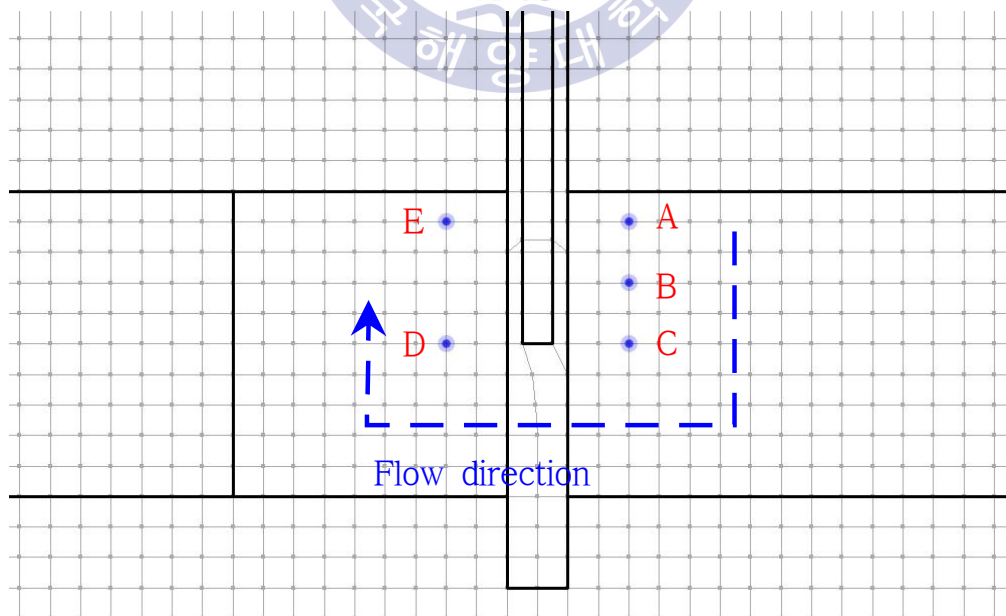
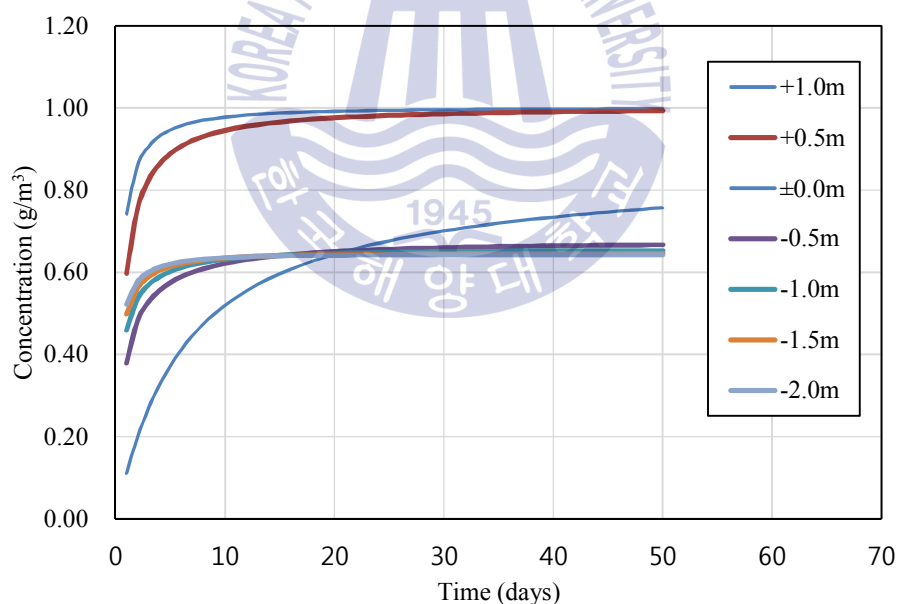


Figure 6.32 Five monitoring nodes to present time history graph of contaminant concentration for steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall

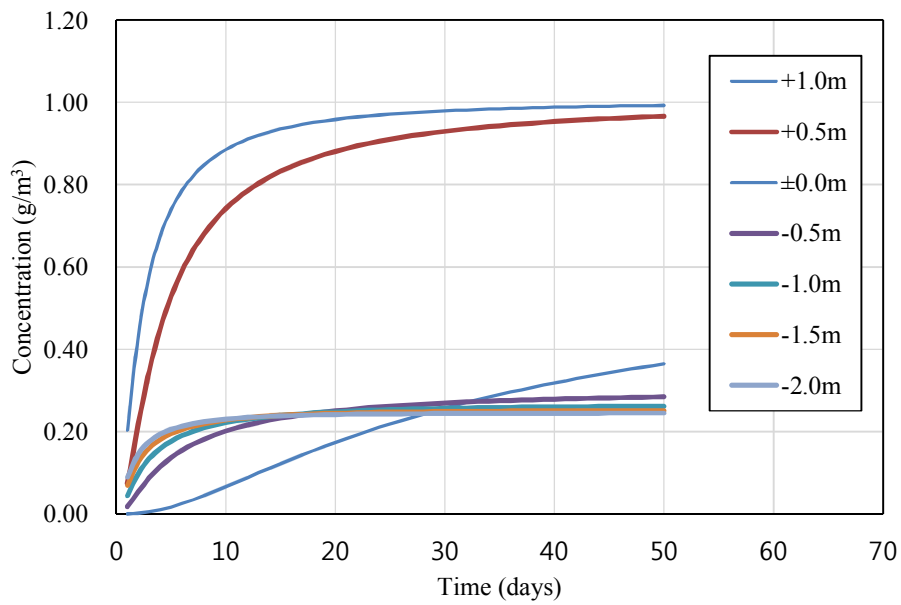
Figs. 6.33, 6.34는 해역으로의 유로 흐름방향에 위치한 각 노드에서의 내수위 조건에 따른 오염물 농도를 나타내었다. 50년 후 오염물 보면 내수위가 해수위보다 같거나 낮으면 지하수 흐름이 발생하지 않으므로 오염물질 이동은 농도차에 의한 확산에 의해서만 발생하여 그 양이 매우 작은 것으로 나타났다. 시간별 오염물 농도를 보면 내수위가 높을 경우 Node A, B, E는 10년 내에 농도가 급격히 상승하는 것으로 나타났고, Node C, D의 경우에는 20년까지는 급격히 상승하다 10에서 30년까지는 서서히 증가하는 것으로 나타났다.

50년 후의 오염물 농도에서 보는 바와 같이 내수위가 해수위보다 같거나 낮게 유지하면 오염물 누출이 거의 발생하지 않는 것으로 미루어볼 때 해상 폐기물매립장의 운영에 있어서도 폐기물 매립 종료 후에는 침출수 방지를 위하여 내부 수위를 낮게 관리하는 등의 능동적 수위관리 방법이 필요하다(Chae et al., 2011; Kwon et al., 2012).

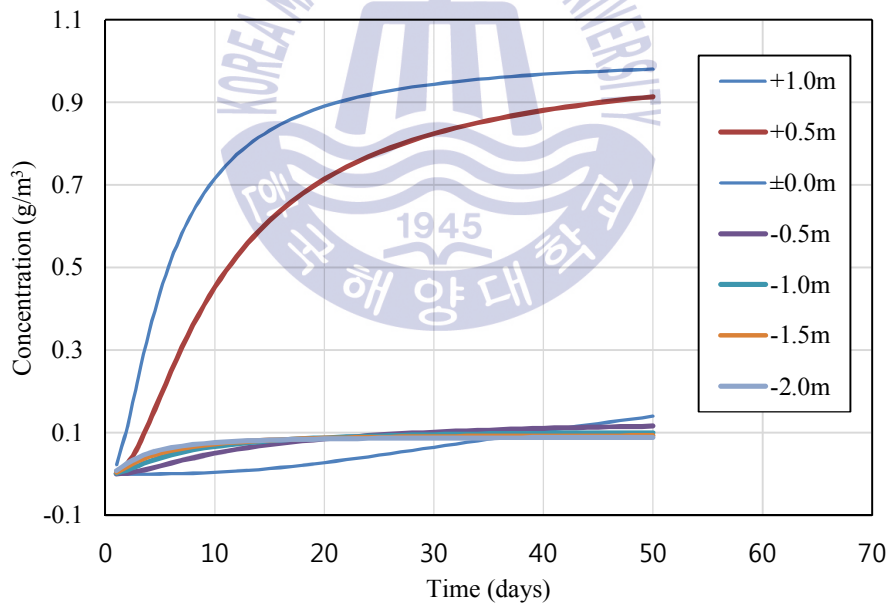


(a) Node A

Figure 6.33 Time history graph of contaminant concentration at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall

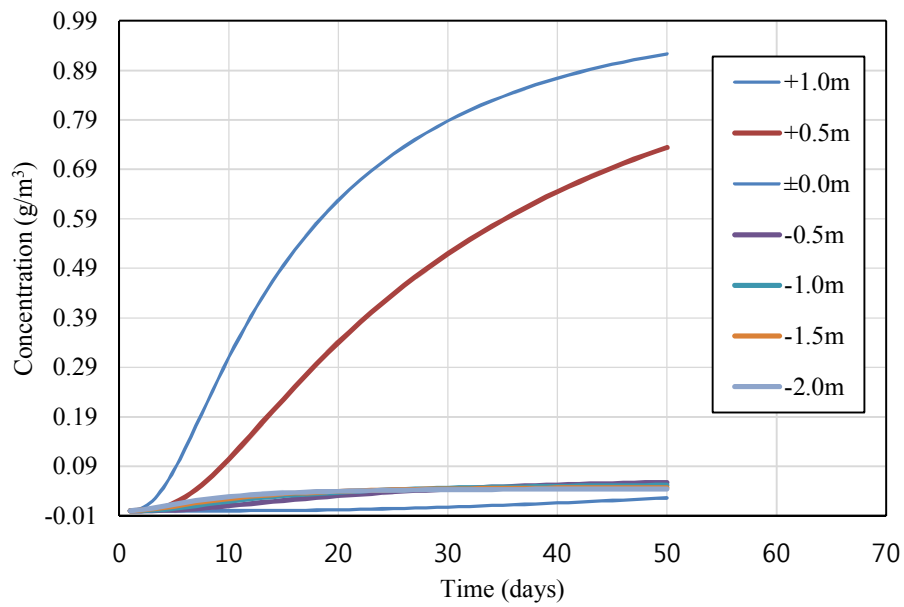


(b) Node B

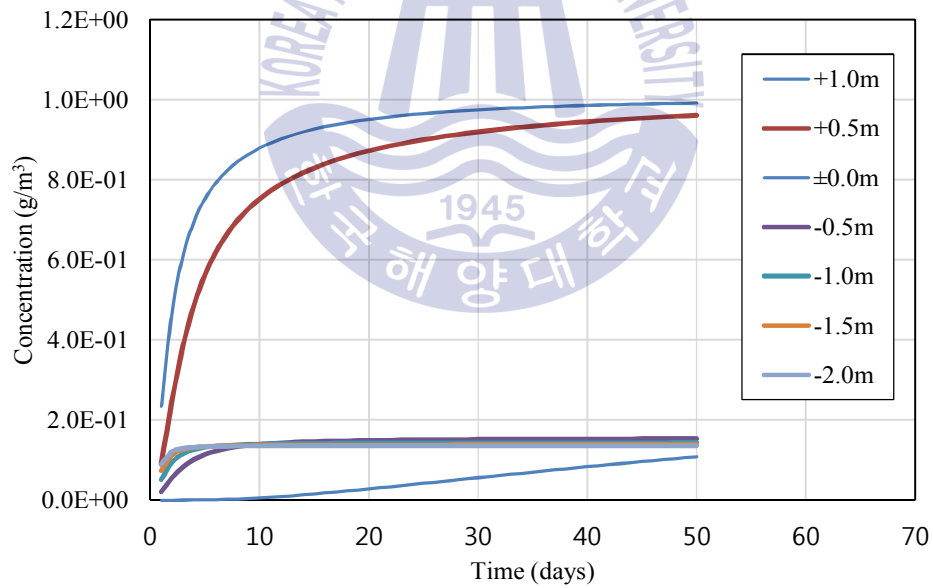


(c) Node C

Figure 6.33 Time history graph of contaminant concentration at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall (continued)

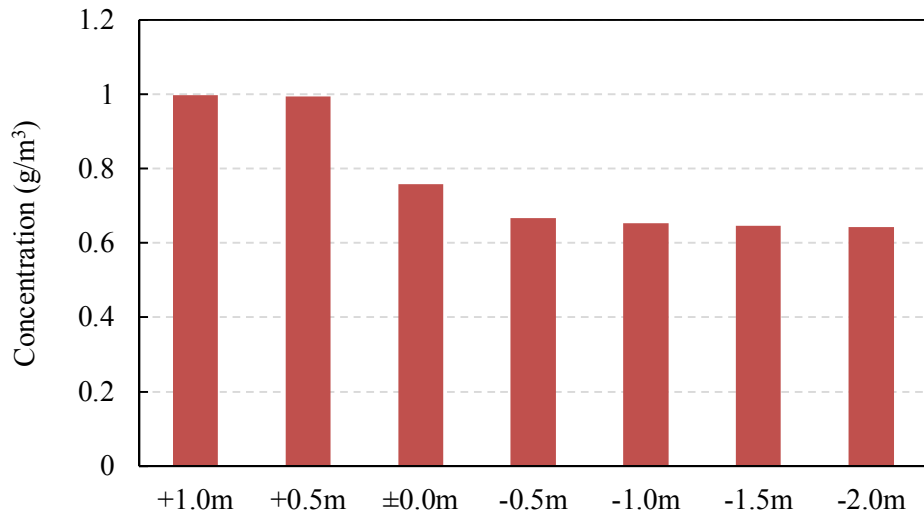


(d) Node D



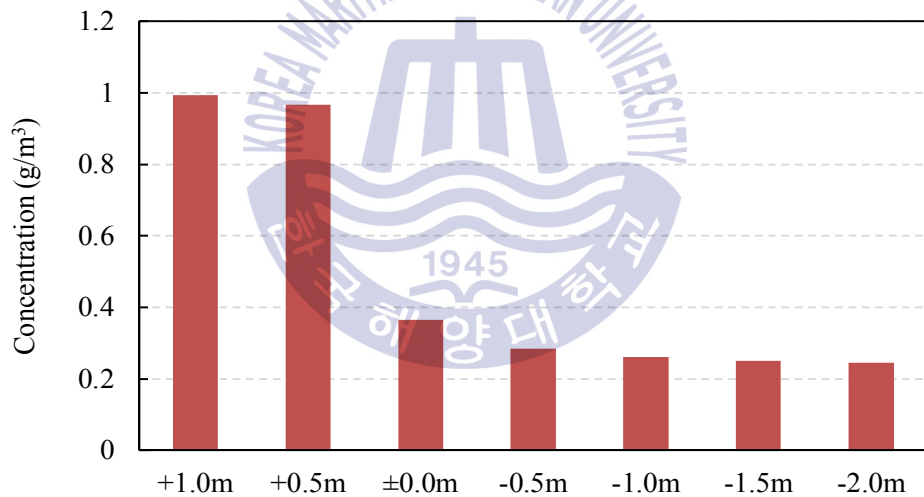
(e) Node E

Figure 6.33 Time history graph of contaminant concentration at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall (continued)



Analysis case

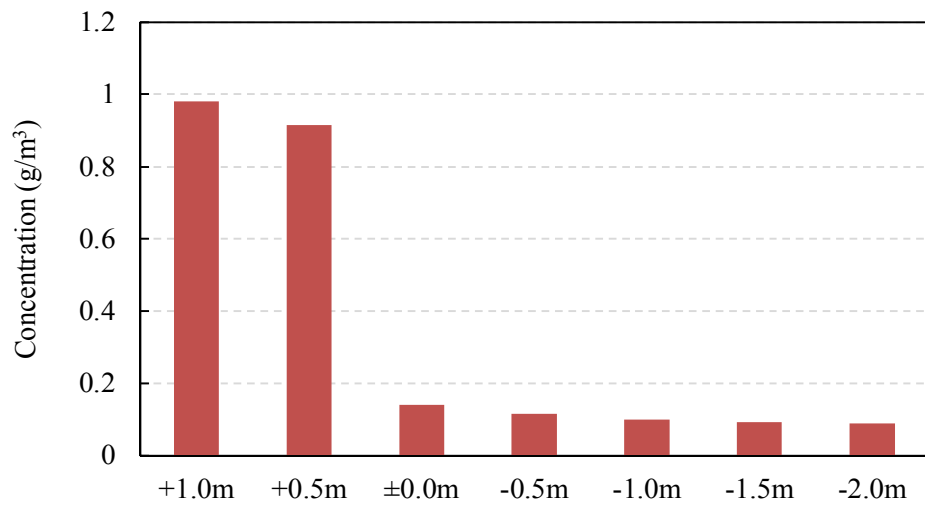
(a) Node A



Analysis case

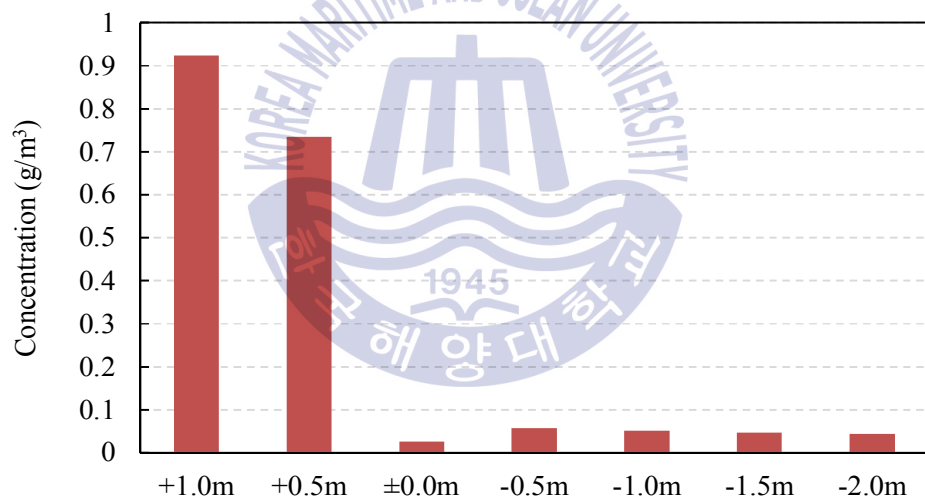
(b) Node B

Figure 6.34 Concentration after 50 years at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall



Analysis case

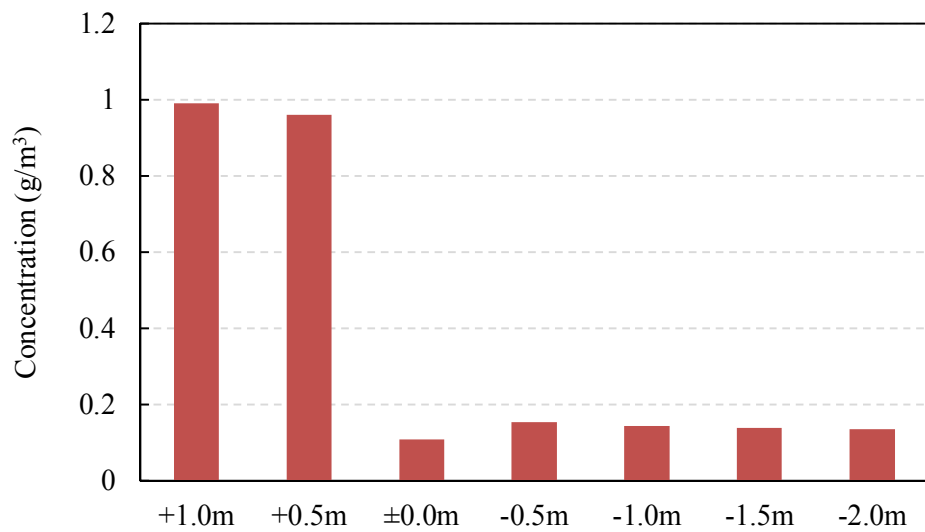
(c) Node C



Analysis case

(d) Node D

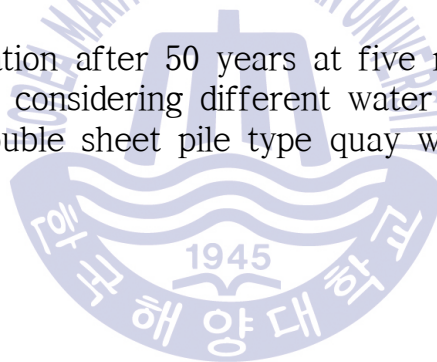
Figure 6.34 Concentration after 50 years at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall (continued)



Analysis case

(e) Node E

Figure 6.34 Concentration after 50 years at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall (continued)



6.2.3 경사제식 호안

Fig. 6.35는 차수시트에서 약 1m 하부 위치에서 해역 방향으로 유로의 흐름 방향으로 시간에 따른 오염물 농도 변화를 나타내기 위한 각 노드의 위치를 나타낸다.

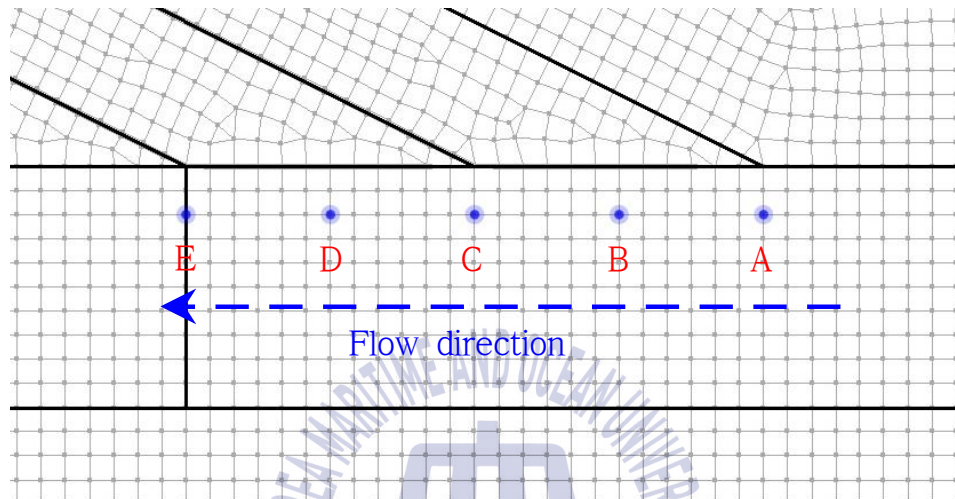
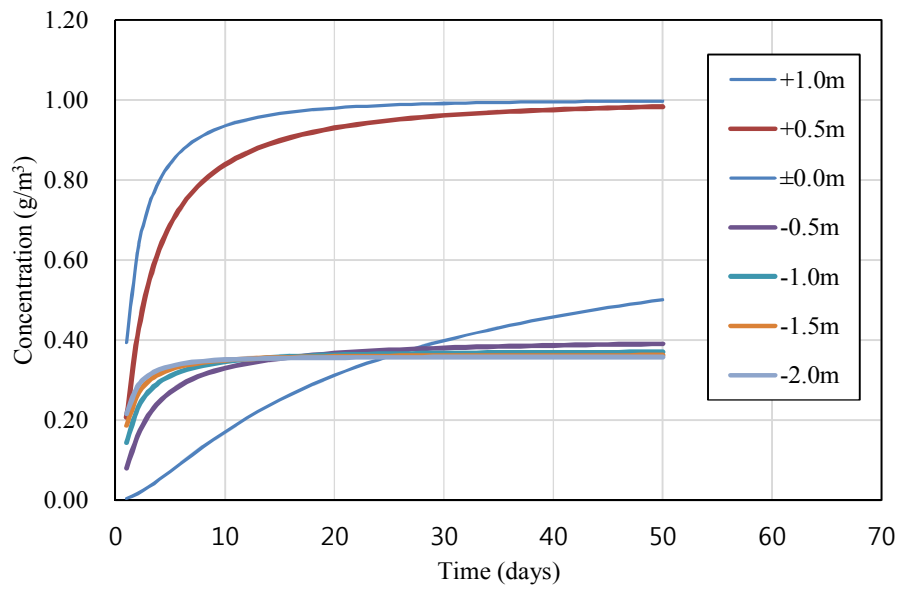


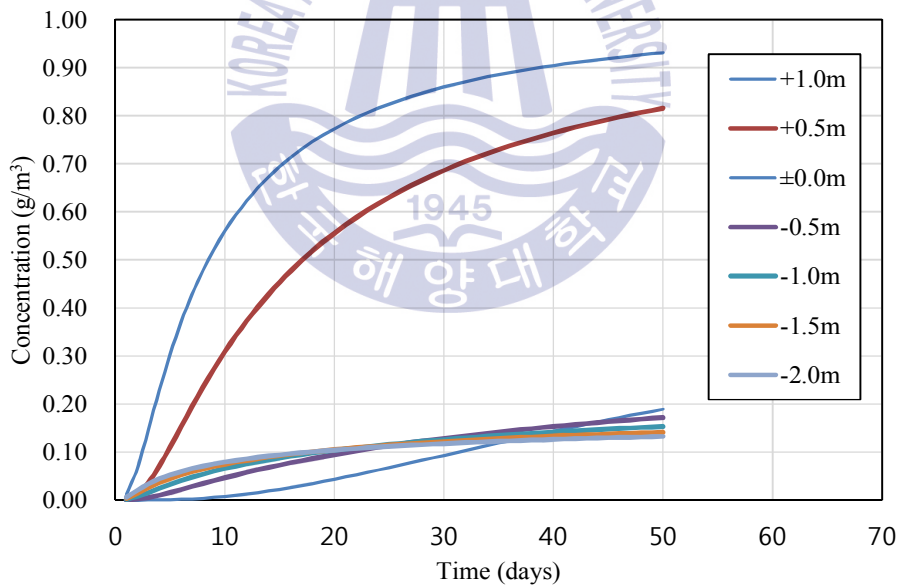
Figure 6.35 Five monitoring nodes to present time history graph of contaminant concentration for steady flow considering different water level of landfill side in rubble mound type quay wall

Figs. 6.36, 6.37은 해역으로의 유로 흐름방향에 위치한 각 노드에서의 내수위 조건에 따른 오염물 농도를 나타내었다. 경사제식 호안에서도 2중 연직벽체 호안과 비슷한 경향성을 나타나고 있으나, 오염물 위치에서 가장 먼 Node D, E의 경우 30년까지는 농도변화가 거의 없거나 매우 작게 증가하다 30년이 지나서는 급격히 증가하고 있다. 이것은 차수시트의 이동 통로가 어려우므로 바다 차수시스템으로 오염물이 확산되는데 그 시간이 오래 걸리는 것을 알 수 있으며, 이마저도 내수위가 1.0m일 경우 이고 내수위가 같거나 낮으면 그 양이 매우 작은 것으로 나타났다.

50년 후의 오염물 농도에서 보는 바와 같이 내수위가 해수위보다 같거나 낮게 유지하면 오염물 누출이 거의 발생하지 않는 것으로 미루어볼 때 침출수 방지를 위하여 내부 수위를 낮게 관리하는 것이 중요하다는 것이 확인되었다.

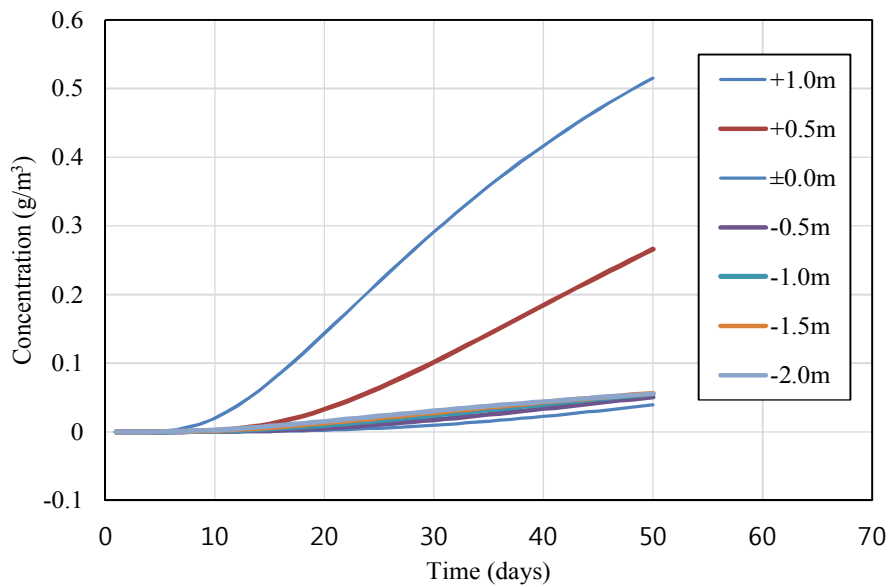


(a) Node A

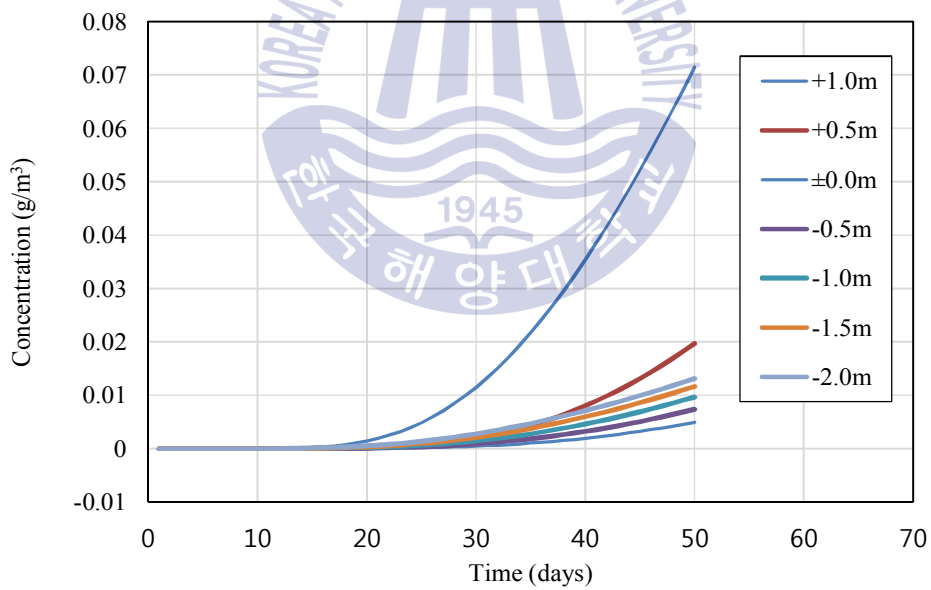


(b) Node B

Figure 6.36 Time history graph of contaminant concentration at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in rubble mound type quay wall

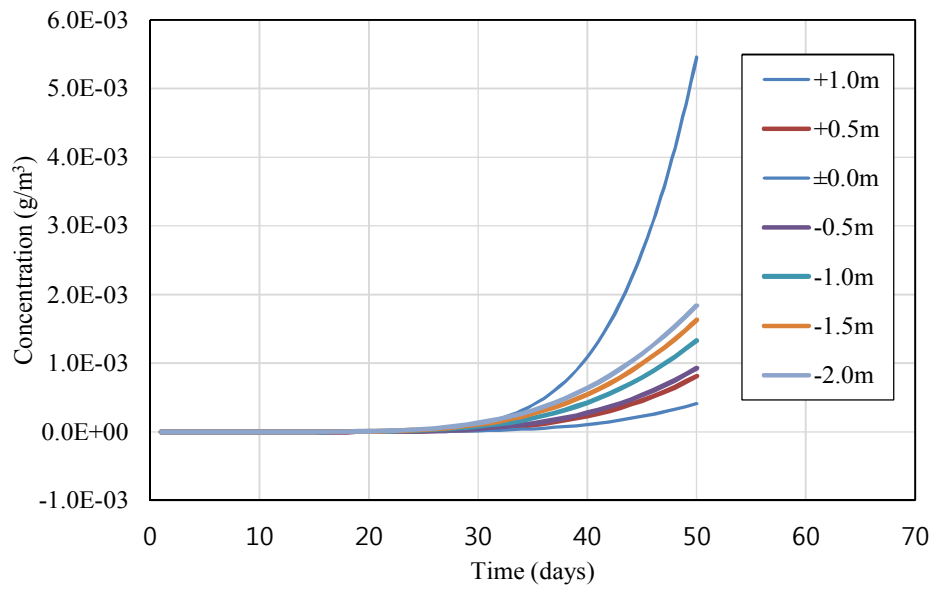


(c) Node C



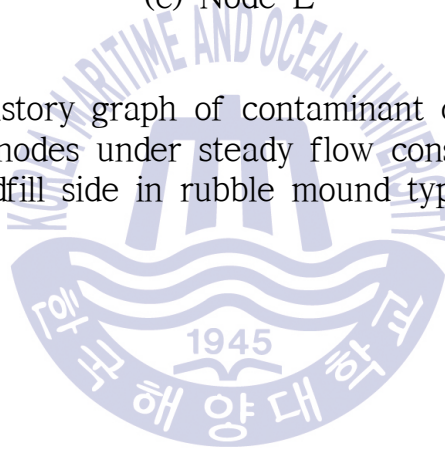
(d) Node D

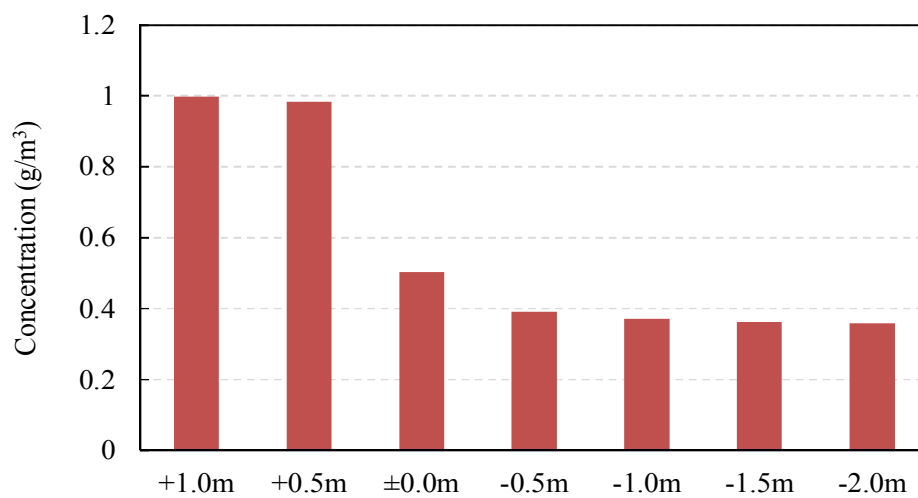
Figure 6.36 Time history graph of contaminant concentration at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in rubble mound type quay wall (continued)



(e) Node E

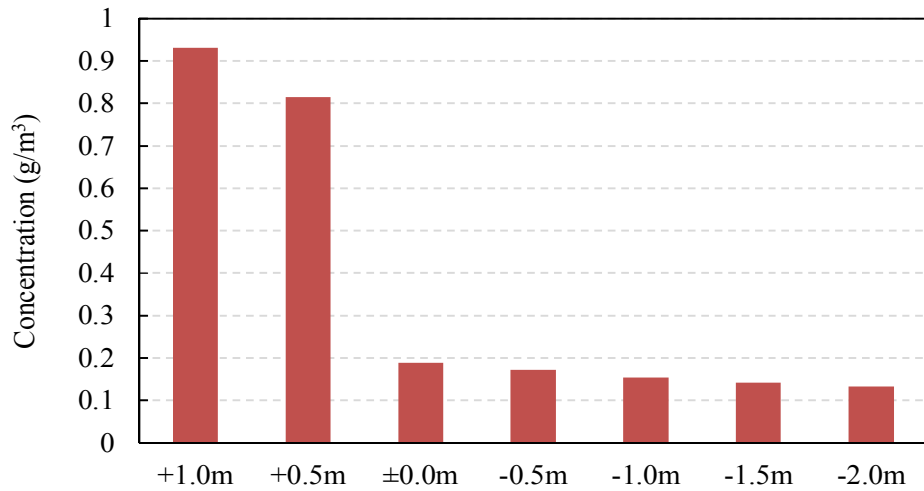
Figure 6.36 Time history graph of contaminant concentration at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in rubble mound type quay wall (continued)





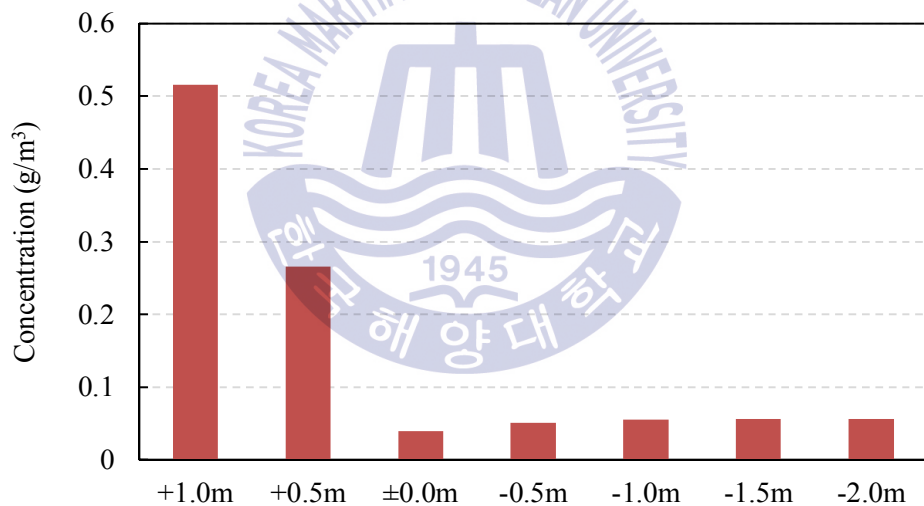
Analysis case
(a) Node A

Figure 6.37 Concentration after 50 years at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall



Analysis case

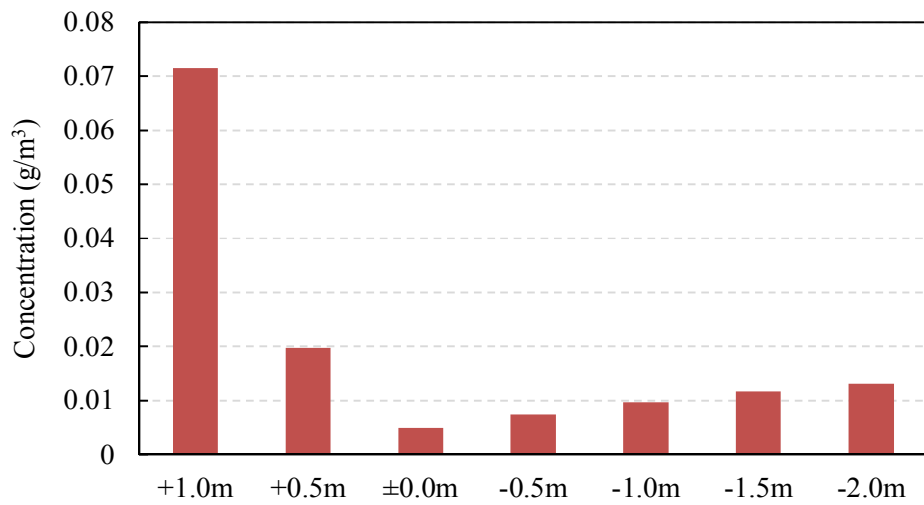
(b) Node B



Analysis case

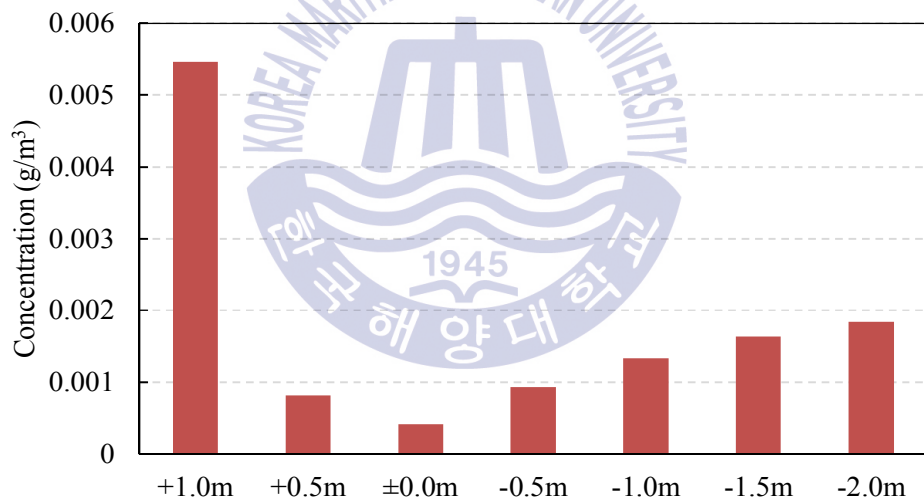
(c) Node C

Figure 6.37 Concentration after 50 years at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall (continued)



Analysis case

(d) Node D



Analysis case

(e) Node E

Figure 6.37 Concentration after 50 years at five monitoring nodes under steady flow considering different water level of landfill side in double sheet pile type quay wall (continued)

제 7 장 결 론

7.1 결론

본 연구에서는 해상 폐기물매립장에서의 오염물의 누출을 방지하는 차수시스템에 대한 최적의 최소기준을 제안하기 위하여 해외 시공사례를 참고하여 해상 폐기물 매립장의 호안 형식으로 2중 연직벽체구조 및 경사제식호안구조를 선정하고, 각각 바닥 및 측면 차수시스템의 기본적인 차수공에 대하여 침투·이류 분산해석을 수행하였다. 우선 바닥 및 측면 차수시스템의 차수성능을 평가하기 위하여 정상류 조건 하에서 해석을 수행하였으며 그 결과를 바탕으로 최적 성능을 나타내는 최소기준을 제안하였다. 또한 해상 폐기물매립장이라는 입지적 조건을 고려하여 수위 변동을 고려한 비정상류 조건 하에서 해석을 수행하여 그 결과를 정상류 조건 하에서의 해석결과와 비교하였다. 아울러 앞에서 언급한 해석결과와 폐기물매립장 측의 내수위가 해역수위와 동일하거나, 낮을 경우에 대해서도 비교 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 해상 폐기물매립장 바닥 차수시스템의 투수계수는 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 이하인 불투수성 지층이 두께 5m 이상이거나 이와 동등한 차수효과를 가진 차수시스템을 설치할 때 가장 최적성능을 가지는 것으로 확인되었다.
- 2) 측면 차수시스템은 투수계수 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 이하인 두께 50cm 이상이거나 이와 동등한 차수효과를 가진 차수시트 등의 차수시스템을 설치하는 경우 가장 적절한 것으로 확인되었다. 또한, 바닥 차수시스템과 일체가 되어 차수기능을 발휘하도록 바닥 차수시스템의 기준에 해당하는 침투시간을 확보할 수 있는 근입깊이가 필요하다.

- 3) 경사제식 호안은 2중 시트 간의 중간보호층에 투수계수가 작은 재료를 사용하면 차수시트에 어떤 손상이 생긴 경우라도 침투·이류 분산 정도가 적은 것을 볼 때 침투리스크를 경감할 수 있으며 보다 신뢰성 높은 백업 기능을 갖춘 차수구조로 적용할 수 있다.
- 4) 해상 폐기물매립장 내부 수위를 외부 해역의 평균 수위보다 높게 가정한 정상류 하에서의 차수성능 평가가 수위 변동을 고려한 비정상류 하에서의 차수성능 평가보다 보수적인 해석결과를 나타내므로 적절한 가정 및 경계조건을 적용한 정상류 해석을 통한 차수성능 평가가 효율적으로 이용될 수 있음을 확인하였다.
- 5) 폐기물매립장의 내부 수위가 외부 해역의 평균 수위보다 같거나 낮을 경우에는 침투·이류 분산의 유출량이 현저하게 작으므로 내부 수위를 해역의 수위보다 낮게 관리하는 모니터링이 중요하다는 것이 확인되었다.
- 6) 본 연구에서는 침투·이류 분산 해석을 통해 최적 성능을 나타내는 최소 기준을 제안하기 위해 바닥 차수시스템인 점토층의 침투수의 정화작용이나 흡착은 무시하였으나 이를 고려한다면 더욱 경제적이고 현실적이 설계가 가능할 것으로 판단된다.

7.2 향후 연구를 위한 제언

본 절에서는 본 연구를 바탕으로 향후 연구를 위한 제언은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 사용한 매개 변수에 대해 향후 개선의 여지가 있다고 판단된다. 특히 분자 확산 계수에 관해서는 각 구성 층에서 공통 값을 이용하고 있지만, 구성 지층에 따라 확산 계수는 달리 적용하는 것이 바람직하다고 판단되므로 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 침투·이류 분산 분석을 실시함에 있어서 유해 물질의 양을 누출량으로 계산했지만, 유해 물질 농도를 1ppm으로 가정한 값이므로 해석결과의 누출량과 실제 누출되는 유해 물질 양의 관련성은 확실하지 않다. 또한, 폐기물의 종류에 따라 유해물질 농도 역시 달라지므로 폐기물매립장의 모니터링 및 실험적 연구를 통해 초기 농도 등의 분석 조건의 정확도를 향상시킬 필요가 있다. 분석 조건의 정확도가 향상되면 경제성 측면에서의 차수시스템 최적의 기준을 제시할 수 있을 것이다.
- 3) 바닥 차수시스템으로 적용되는 해저지반 점토층의 흡착 기능이 오염물 이동에 미치는 영향에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 본 연구에 적용한 이중 연직 벽체구조 및 경사식 호안을 제외한 다양한 호안 형식에 대한 연구가 필요하다.
- 5) 해상에 시공되는 지형적 특징으로 비균질한 해저지반 및 지층 구조가 오염물 이동에 미치는 영향에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Chae, K.S., Lee, S.P. & Oh, M.H., 2011. Design and construction technology of marine waste landfill sites. *Journal of the Korean Civil Engineering and Textile Society*, Vol10, No.4, pp.16-24.
- Devlin, J.F. & Parker, B.L. 1996. Optimum Hydraulic Conductivity to Limit Contaminant Flux Through Cutoff Walls. *Groundwater*, vol. 34, no. 4, pp. 719-726.
- Foose, G.J. 2010. A steady-state approach for evaluating the impact of solute transport through composite liners on groundwater quality. *Waste Management*, vol. 30, no. 8-9, pp. 1577-1586.
- GEO-SLOPE (2012a). *Seepage Modeling with SEEP/W.*, GEO-SLOPE International Ltd.
- GEO-SLOPE (2012b). *Contaminant Modeling with CTRAN/W.*, GEO-SLOPE International Ltd.
- Hwang, W.K., Oh, M.H., Kim, T.H. & Kim, H.E., 2018. Evaluation of Optimal Performance of Hydraulic Barriers in Offshore Landfill using Seepage-Advection-Dispersion Analysis under Steady State Flow, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 30(2), pp. 61~68.
- Kwon, O.S., Oh, M.H. & Chae, K.S., 2012. *Management type waste landfill revetment design and construction management manual*. CIR: Seoul.
- Mitchell, J.K. & Rumer, R.R. 1997. Waste Containment Barriers : Evaluation of the Technology, In situ Remediation of the Geoenvironment, J.C. Evans eds., *Geotechnical Special Publication*, No. 71, ASCE, pp. 1~25.
- Neville, C.J. & Andrews, C.B. 2006. Containment Criterion for Contaminant

Isolation by Cutoff Walls. *Groundwater*, vol. 44, no. 5, pp. 682-686.

Oh, M.H., Kwon, O.S., Kim, G.H. & Chae, K.S., 2012. Introduction on Offshore Waste Landfill and Potential Sites. *Journal of the Korean Civil Engineering and Textile Society*, Vol60, No.11, pp.40-48.

Oh, M.H., Park, H.Y. & Kwon, O.S., 2016. Analysis on Seepage Behavior According to Extended length of HDPE Sheet of Rubble Mound Revetment at Offshore Landfill. *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol15, No.3, pp.39-47.

Osaka Bay Regional Offshore Environmental Improvement Center. 2018. *Osaka Bay Phoenix Project*, Osaka : Osaka Bay Regional Offshore Environmental Improvement Center.

Park, H.Y., Oh, M.H. & Kwon, O.S., 2016. Analysis on Contaminant Transport according to the Embedded Depth of Vertical Barrier of Offshore Landfill. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 78(9) ; 29~37.

Rubin, H. & Rabideau, A.J. 2000. Approximate evaluation of contaminant transport through vertical barriers. *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 40, no. 4, pp. 311-333.

嘉門 雅史, 玉野 富雄, 勝見 武, 小野 諭. 1999. 廃棄物の埋立処分・処分場の跡地利用とリスク管理—山から海へ、そして地下へ—. *土と基礎*, Vol.47, No.1, pp.19-22.

嘉門 雅史, 乾 徹. 2002. 管理型廃棄物処分場の地盤工学的問題と対策. *土木学会論文集*, No.701, III-58, 1-15.

花嶋 正孝, 古市 徹. 2002. はじめてのクローズドシステム処分場—被覆型最終処分場の計画と事例—. オーム社.

沖 健, 鳥崎 肇一, 喜田 浩, 吉田 節, 坂口 祐司, 吉野 久能. 2003. 鋼矢板, 鋼管矢板を用いた鉛直遮水壁の遮水性能の評価. 第 5 回環境地盤工学シンポジウム論文集, pp.53-58.

勝見 武. 2005. 地盤環境汚染の基礎と解析の考え方. civil-eye.com WEB セミナー, CRCソリューションズ.

稲積 真哉, 木村 亮, 山村 和弘, 西山 嘉一, 嘉門 雅史. 2005. 連結鋼管矢板による鉛直遮水壁の施工技術. 日本材料学会, Vol.54, No.11, pp.1105-1110.

渡部 要一, 吉野 久能, 柿本 龍二, 山田 耕一, 鵜飼 亮行, 沖 健, 岡 由剛, 喜田 浩, 永尾 直也, 望月 武, 木下 雅敬. 2006. 鋼製遮水壁の遮水性能と適用性に関する研究. 港湾空港技術研究所, 資料 1142.

稲積 真哉, 木村 亮, 三津 田祐基, 山村 和弘, 西山 嘉一, 嘉門 雅史. 2006. 廃棄物埋立護岸における H-H 継手を施した連結鋼管矢板の開発と適用性評価. 土木学会論文集 C, 土木学会, Vol.62, No.2, pp.390-403.

稲積 真哉, 若月 正, 小林 賢勝, 木村 亮. 2007. 廃棄物処分場の遮水処理剤へ適用される膨潤性止水材の膨潤・強度特性. 環境工学研究論文集, 土木学会, Vol.44, pp.463-469.

みなと総合研究財団 (WAVE), 2008. 管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル (改訂版), 東京:WAVE.

日本環境衛生センター (MOE), 2008. 海面最終処分場閉鎖・廃止適用マニュアル策定に向けた検討結果報告書改訂版(案). 東京:MOE.

中山 裕文, 島岡 隆行, 水谷 聡. 2008. ライフサイクル環境負荷評価を完結させるための最終処分場環境会計に関する研究. 平成 19・20 年度廃棄物処理等科学研究費総合研究費報告書, 環境省科研.

稲積 真哉, 磯田 隆行, 若月 正, 川端 秀雄. 2012. 廃棄物処分場における膨潤性止水材の劣化促進試験とアレニウスの法則に基づく耐久性予測. 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp.291-296.

渡部 洋一, 浅沼 丈夫, 鵜飼 亮行. 2013. 海面処分場の現状と将来性, 2. 海面処分場の原理と現状. 地盤工学会誌, Vol.61, No4, pp.54-61.

奥野 直紀. 2014. 廃棄物処分場における有害物質の移流・分散を考慮したリスクマネジメントに関する研究. 修士論文. 京都:京都大学.

감사의 글

논문을 준비하는 과정에는 힘도 들고 막막함이 많았지만 이렇게 마무리하는 시점이 되니 감회가 새롭습니다. 그동안 저를 믿어주시고 묵묵히 지지해주신 모든 분들께 감사의 인사를 전합니다.

직장과의 병행으로 주말 밖에 시간이 없었던 저를 위해 매주 늦은 주말까지 저를 기다려 주시고 아낌없는 조언을 통해 박사 논문답게 발전시키도록 동기를 불어넣어주신 김태형교수님께 깊은 감사를 드립니다. 논문 시작부터 마무리까지 자신의 일처럼 나서서 도움을 주었던 황웅기박사님께도 진심으로 감사드립니다. 두 분으로 인해 논문을 준비하고 마무리 할 수 있게 되었습니다.

항상 온화한 미소로 지지해 주시고, 농친 부분을 바로잡을 수 있도록 도와주신 김도삼교수님, 이번 학기에 논문을 마무리할 수 있도록 끊임없이 격려해주신 경갑수교수님, 대학원 입학 때부터 많은 배려를 해주신 김태곤교수님, 친절히 관심가져 주시고 조언해 주신 이종우교수님, 이재하교수님, 오재홍교수님께도 감사의 인사를 전합니다. 기꺼이 시간내어 주시고 수고했다고 격려해주신 서영교교수님, 먼길 달려와 좋은 의견을 주신 홍석우교수님, 강기천 교수님께도 감사의 인사를 전합니다.

매주 모여 서로 격려하며, 각자 목표를 위해 정진하고 있는 동료 학우분들과 항상 발벗고 도움을 준 연구실 후배님들께도 감사드립니다.

또한, 박사 학위에 도전할 수 있도록 도움주시고, 격려와 배려해주신 박이근 대표님과 유상호 대표님께도 깊은 감사를 드립니다. 논문을 마무리할 수 있도록 도움을 많이 주었던 직장동료들에게도 고마운 마음을 전합니다.

용기 잃지 않도록 지원해준 가족들. 항상 힘의 근원이 되는 가족들입니다. 모두 사랑합니다.

그 밖에 감사할 분들이 정말 많습니다. 늘 감사하며, 겸손한 사람으로 살아가겠습니다. 감사합니다.

2019년 1월 김 향 은 올림